

**ADILSON CARLOS MACHADO**

**DETERMINAÇÃO DAS PERDAS SUPLEMENTARES  
EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS  
PELO MÉTODO EH-STAR**

**FLORIANÓPOLIS**

**2008**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DETERMINAÇÃO DAS PERDAS SUPLEMENTARES  
EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS  
PELO MÉTODO EH-STAR**

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a obtenção  
do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

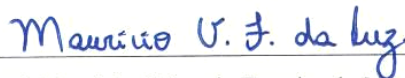
**ADILSON CARLOS MACHADO**

Florianópolis, Julho de 2008.

# DETERMINAÇÃO DAS PERDAS SUPLEMENTARES EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS PELO MÉTODO EH-STAR

ADILSON CARLOS MACHADO

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina’

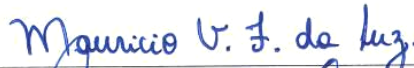


Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.  
Orientador

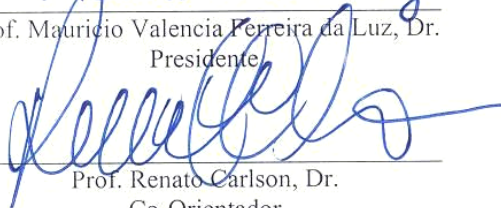


Profª. Kátia Campos de Almeida, Dra.  
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



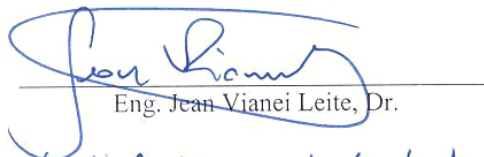
Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.  
Presidente



Prof. Renato Carlson, Dr.  
Co-Orientador



Prof. Nelson Jhoel Batistela, Dr.



Eng. Jean Viane Leite, Dr.



Eng. Carlos Guilherme da Costa Neves, Dr.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Professor Mauricio Valencia Ferreira da Luz pelo estímulo e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

À UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina) em especial ao GRUCAD (Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos) por terem organizado este curso de mestrado profissionalizante.

Aos professores Renato Carlson, Nelson Sadowski, João Pedro Assumpção Bastos, Patrick Kuo-Peng, Nelson Jhoe Batistela, Walter Pereira Carpes Júnior e Cursino Brandão Jacobina pelas aulas ministradas.

Ao Sr. João Evangelista Pacheco de Souza pelo auxílio no entendimento do assunto envolvido e por gentilmente dispor o desenvolvimento que fez para que fosse incluído nesta dissertação (cap. 8).

À Banca Examinadora desta dissertação, pelas sugestões apresentadas.

À WEG pela iniciativa de melhor capacitar seus engenheiros disponibilizando gratuitamente aos seus colaboradores a oportunidade de se tornarem mestres.

À minha esposa Heloisa Maria dos Santos Machado pela paciência e compreensão da necessidade de muitas horas de dedicação para a realização deste trabalho.

Aos colegas do departamento de P&D da WEG por auxiliar em diversos momentos, em especial Eduardo Duarte que foi autor de diversas figuras.

Aos colegas dos Laboratórios Elétricos da WEG pela realização dos ensaios.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários  
para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

## **DETERMINAÇÃO DAS PERDAS SUPLEMENTARES EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS PELO MÉTODO EH-STAR**

**Adilson Carlos Machado**

Julho/2008

Orientador: Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.

Co-orientador: Prof. Renato Carlson, Dr.

Área de Concentração: Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos

Palavras-chave: perdas suplementares, motor de indução trifásico, método eh-star.

Número de páginas: 104

**RESUMO:** Este trabalho se refere ao estudo e a implementação do método de ensaio eh-star para determinação das perdas suplementares em motores de indução trifásicos, proposto na norma IEC 60034-2-1. O ensaio eh-star é realizado sem a necessidade de acoplar o motor a um dinamômetro ou máquina auxiliar, ou seja, o motor trabalha em vazio. Durante o teste o motor é conectado em estrela, com um resistor, denominado  $R_{eh}$ , ligado entre dois terminais de alimentação do motor, sendo o mesmo ligado a uma fonte monofásica. Como resultado aparecerá em seus terminais um sistema trifásico desequilibrado (assimétrico), que será decomposto em dois sistemas simétricos: seqüência positiva e seqüência negativa. São apresentados resultados de diversos motores testados na WEG. Também é apresentada uma simulação deste ensaio com o programa de cálculo utilizado pela WEG Motores. O presente trabalho propõe ainda um novo circuito para obtenção desta alimentação desequilibrada, ligando os terminais do motor à duas fases e o neutro de um gerador trifásico, dispensando a necessidade da utilização do resistor  $R_{eh}$ .

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the  
Requirements for degree of Master in Electrical Engineering

**DETERMINATION OF STRAY LOAD LOSSES IN  
THREE-PHASE INDUCTION MOTORS  
BY EH-STAR METHOD**

**Adilson Carlos Machado**

July/2008

Advisor: Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.

Co-Advisor: Prof. Renato Carlson, Dr.

Area of Concentration: Electromagnetism and Eletromagnetic Devices

Keywords: stray load losses, three-phase induction motors, eh-star method.

Number of pages: 104

**ABSTRACT:** This work mentions the study and the implementation regarding the eh-star test method proposed in the IEC Standard 60034-2-1 for the determination of stray load losses in three-phase induction motors. This test is accomplished with no load, that is, the motor does not need to be connected to a dynamometer or an auxiliary machine. During the test, the motor is star connected with a resistor, referred to as  $R_{eh}$ , installed between two motor terminals. The motor is fed by a single-phase voltage supply. This will result in an unbalanced (asymmetric) three-phase system at the motor's terminals, which can be decomposed into two symmetric systems: positive sequence and negative sequence. Results of several tests accomplished in WEG facilities, as well as simulation results obtained with the software used in WEG for motor calculation, are also presented. Additionally, the present work proposes a new circuit for the attainment of this unbalanced voltage supply, using two phases and the neutral of a three-phase generator, avoiding the need for the  $R_{eh}$  resistor.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>x</b>
<b>SIMBOLOGIA .....</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Perdas suplementares .....</b>	<b>4</b>
2.1 Introdução.....	4
2.2 Origem das perdas suplementares.....	5
2.3 Normas internacionais.....	5
2.4 Ensaios para determinação das perdas suplementares .....	7
2.4.1 Método entrada-saída .....	7
2.4.2 Método pump-back .....	8
2.4.3 Método do dinamômetro diferencial.....	8
2.4.4 Método do diferencial mecânico.....	8
2.4.5 Método back-to-back .....	8
2.4.6 Método de curto-circuito AC/DC .....	9
2.4.7 Método do calorímetro .....	9
2.4.8 Método de rotação reversa.....	9
2.4.9 Método eh-star .....	10
2.5 Conclusão .....	10
<b>3 Método de ensaio eh-star .....</b>	<b>11</b>
3.1 Introdução.....	11
3.2 Alimentação desequilibrada .....	12
3.3 Determinação do resistor $R_{eh}$ .....	14
3.4 Determinação das perdas suplementares.....	14
3.5 Requerimentos para o teste.....	15
3.6 Procedimentos de ensaio .....	16
3.7 Rotina de cálculo .....	17
3.8 Conclusão .....	18
<b>4 Ensaios realizados na WEG .....</b>	<b>19</b>
4.1 Introdução.....	19
4.2 Comentários sobre os ensaios realizados na WEG.....	19
4.3 Ensaio eh-star do motor 15 cv, 4 pólos, 50 Hz, 400/690 V, carcaça IEC 160M. 20	
4.4 Resultado do ensaio eh-star do motor 15cv 4p.....	23
4.5 Resultados dos ensaios eh-star realizados na WEG.....	24
4.6 Comparativa de perdas suplementares: eh-star x NEMA x IEC 34-2 .....	25
4.7 Conclusão .....	26
<b>5 Componentes simétricas .....</b>	<b>27</b>
5.1 Introdução.....	27
5.2 Desenvolvimento .....	27
5.3 Exemplos .....	28
5.4 Conclusão .....	30
<b>6 Desenvolvimento matemático da rotina eh-star .....</b>	<b>31</b>

6.1	Introdução.....	31
6.2	Análise das tensões .....	31
6.3	Análise das correntes .....	32
6.4	Correção da resistência de fase ( $R_s$ ) pela temperatura.....	36
6.5	Tensões ‘internas’ (sobre $R_{fe}$ e $X_m$ ) – valores de linha .....	37
6.6	Tensões ‘internas’ de sequência positiva e negativa – valores de linha .....	38
6.7	Tensões ‘internas’ de sequência positiva e negativa – valores de fase.....	39
6.8	Tensões ‘internas’ para cada uma das fases U-V-W .....	39
6.9	Correntes na resistência de perdas no ferro.....	39
6.10	Correntes ‘internas’ para cada uma das fases U-V-W .....	39
6.11	Correntes ‘internas’ de sequência positiva e negativa .....	40
6.12	Potência ativa no entreferro.....	40
6.13	Correção das perdas mecânicas .....	41
6.14	Perdas suplementares .....	41
6.15	Perdas suplementares devido à sequência negativa.....	41
6.16	Correção no valor das perdas suplementares.....	42
6.17	Conclusão .....	43
<b>7</b>	<b>Simulação do ensaio eh-star no cálculo da WEG (M2E).....</b>	<b>44</b>
7.1	Introdução.....	44
7.2	Cálculo do motor 15cv, 4 pólos, 50 Hz, 400/690 V, carcaça IEC 160M.....	44
7.3	Conclusão .....	45
<b>8</b>	<b>Ensaio alternativo baseado no método eh-star .....</b>	<b>46</b>
8.1	Introdução.....	46
8.2	Ligação do aparelho de medição Norma.....	47
8.3	Dados preliminares .....	47
8.4	Desenvolvimento matemático .....	47
8.4.1	Linha trifásica desequilibrada.....	47
8.4.2	Componentes simétricas.....	47
8.4.3	Cálculo dos módulos das componentes de sequência positiva e negativa .....	48
8.4.4	Relação entre o valor eficaz e os módulos das componentes .....	52
8.4.5	O ensaio com alimentação desequilibrada .....	53
8.4.6	Determinação de $T_F$ e $T_T$ .....	53
8.4.7	Determinação das perdas Joule no estator de sequência positiva e negativa ..	54
8.4.8	Determinação das perdas no ferro de sequência positiva e negativa .....	55
8.4.9	Determinação da diferença $T_F - T_T$ .....	55
8.4.10	Diferença entre as potências de entrada das duas seqüências .....	57
8.5	Correção das perdas mecânicas .....	64
8.6	Perdas suplementares devido à sequência negativa.....	64
8.7	Correção no valor das perdas suplementares.....	65
8.8	Comparação entre os métodos de cálculo proposto e o eh-star .....	65
8.9	Comentários adicionais .....	69
8.10	Determinação das perdas suplementares utilizando $I_{ef}$ .....	69
8.11	Conclusão .....	71
<b>9</b>	<b>Ensaio do motor 15 cv 4 pólos pelo método alternativo .....</b>	<b>72</b>
9.1	Introdução.....	72
9.2	Resultado do ensaio .....	72
9.3	Verificação do ensaio.....	74



9.4	Comparação do resultado com o ensaio eh-star .....	74
9.5	Conclusão .....	74
<b>10</b>	<b>Considerações finais.....</b>	<b>75</b>
10.1	Artigos provenientes do trabalho de dissertação .....	77
10.2	Propostas para trabalhos futuros.....	78
<b>ANEXOS.....</b>		<b>79</b>
<b>Anexo 1 - Corrente de teste .....</b>		<b>80</b>
<b>Anexo 2 - Temperatura inicial e final do enrolamento .....</b>		<b>81</b>
<b>Anexo 3 - Regressão linear de <math>I_v</math> x <math>T_{enr}</math> .....</b>		<b>82</b>
<b>Anexo 4 - Relação entre tensão de fase e de linha num sistema trifásico .....</b>		<b>84</b>
<b>Anexo 5 - Relação entre as tensões de fase e suas respectivas componentes .....</b>		<b>86</b>
<b>Anexo 6 - Resistência do estator de fase e de linha.....</b>		<b>88</b>
<b>Anexo 7 - Relação entre as tensões de fase e de linha para as duas seqüências .....</b>		<b>90</b>
<b>Anexo 8 – Planilha com resultados do ensaio eh-star do motor 11 kW da ref. [2].....</b>		<b>92</b>
<b>Anexo 9 - Exemplo de ensaio e cálculo com a rotina proposta (software Mathcad)...</b>		<b>93</b>
<b>Anexo 10 - Eliminação do fator k .....</b>		<b>102</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>104</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Gráfico das perdas suplementares em função do quadrado da carga .....	6
Figura 3.1 – Circuito elétrico para o ensaio eh-star .....	11
Figura 3.2 – Circuito simplificado após a mudança da chave S para a posição 2 .....	12
Figura 3.3 – Máquinas virtuais simulando a máquina sob teste eh-star.....	13
Figura 3.4 – Gráfico $(I_{(-)}/I_{tN})^2 \times P_{sup}$ referente ao exemplo da Tabela 3.2.....	18
Figura 4.1 – Disposição inicial para o teste eh-star no motor 15 cv ( $R_{eh} = 6 \Omega$ ) .....	22
Figura 4.2 – Disposição final para o teste eh-star no motor 15 cv ( $R_{eh} = 9 \Omega$ ).....	22
Figura 4.3 – Planilha com resultado do teste eh-star no motor 15cv com $R_{eh}$ de $9 \Omega$ .....	23
Figura 6.1 – Diagrama vetorial de um sistema trifásico desequilibrado .....	31
Figura 6.2 – Triângulo das tensões.....	32
Figura 6.3 – Diagrama vetorial das correntes trifásicas .....	33
Figura 6.4 – Triângulo das correntes.....	33
Figura 6.5 – Tensões internas (sobre $R_{fe}$ e $X_m$ ) – valores de linha .....	38
Figura 6.6 – Corrente na fase U .....	40
Figura 8.1 - Circuito para o ensaio proposto em [8] .....	46
Figura 8.2 – Grandeza trifásica G com componentes $G_1$ , $G_2$ e $G_3$ .....	48
Figura 8.3 – Detalhe do ângulo $\alpha$ entre as componentes $G_1$ e $G_2$ .....	50
Figura 8.4 – Paralelogramo formado pelas componentes $G_1$ e $G_2$ .....	51
Figura 8.5 – Triângulo formado pelas componentes $G_1$ , $G_2$ e $G_3$ .....	51
Figura 8.6 - Paralelogramos formados pelas componentes $G_1G_3$ e $G_2G_3$ .....	51
Figura 8.7 - Circuito original proposto em [8].....	54
Figura 8.8 – Gráfico $(I_{(-)}/I_{tN})^2 \times P_{sup(-)}$ a partir da Tabela 8.3 .....	68
Figura 8.9 – Gráfico $(I_{(-)}/I_{tN})^2 \times P_{sup(-)}$ a partir da Tabela 8.4 .....	68
Figura 8.10 – Gráfico $(I_{ef}/I_{tN})^2 \times P_{sup}$ a partir da Tabela 8.6 .....	70
Figura 8.11 – Gráfico $(I_{ef}/I_{tN})^2 \times P_{sup}$ a partir da Tabela 8.7 .....	70
Figura 9.1 – Gráfico $(I_{ef}/I_{tN})^2 \times P_{sup}$ a partir da Tabela 9.2 .....	73
Figura A2.1 – Variação da resistência elétrica do cobre com a temperatura .....	81
Figura A3.1 – Gráfico $I_v \times T_{enr}$ .....	75
Figura A3.2 – Determinação da intersecção B.....	76
Figura A4.1 – Diagrama vetorial das tensões de fase e de linha de um sistema trifásico....	77
Figura A6.1 – Enrolamento trifásico ligado em estrela.....	81
Figura A6.2 – Enrolamento trifásico ligado em triângulo (delta).....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Relação entre tensão e corrente de fase e de linha .....	15
Tabela 3.2 – Exemplo de dois motores 11 kW 4p 400V 50Hz, um Y e outro $\Delta$ .....	16
Tabela 3.3 – Exemplo de resultados do ensaio eh-star.....	17
Tabela 4.1 – Motores testados com método eh-star na WEG.....	19
Tabela 4.2 – Parâmetros nominais do motor 15 cv 4p .....	21
Tabela 4.3 – Relação entre as correntes de sequência positiva e negativa nos três ensaios	21
Tabela 4.4 – Resumos dos 31 ensaios eh-star realizados na WEG em 2006 e 2007 .....	24
Tabela 4.5 – Comparativo de perdas suplementares de ensaio.....	25
Tabela 7.1 – Valores do ensaio eh-star do motor 15cv 4p (retirados da Figura 4.3) .....	44
Tabela 7.2 – Valores de cálculo do motor 15cv 4p simulando eh-star (programa M2E) ...	45
Tabela 7.3 – Variação percentual entre cálculo e ensaio.....	45
Tabela 8.1 – Resumo das variáveis para determinação das perdas suplementares .....	64
Tabela 8.2 – Ensaio eh-star motor 11 kW 4p 50 Hz 400V (Y) [2].....	66
Tabela 8.3 – Resultados determinados pela rotina de cálculo do método eh-star [2] .....	67
Tabela 8.4 – Resultados determinados pela rotina de cálculo proposta [8] .....	67
Tabela 8.5 – Variação percentual entre as rotinas de cálculo proposta e eh-star.....	67
Tabela 8.6 – Resultados determinados pela rotina eh-star considerando $(I_{ef}/I_{tN})^2 \times P_{sup}$ ....	69
Tabela 8.7 – Resultados determinados pela rotina proposta considerando $(I_{ef}/I_{tN})^2 \times P_{sup}$ ..	70
Tabela 8.8 – Perdas suplementares em carga nominal .....	71
Tabela 9.1 – Ensaio do motor 15 cv 4p utilizando o método alternativo.....	72
Tabela 9.2 – Resultado do ensaio do motor 15cv 4p utilizando o método alternativo .....	73
Tabela 10.1 – Classificação quanto ao grau de incerteza segundo a IEC 60034-2-1 .....	76

## SIMBOLOGIA

$a$	Fasor de módulo 1 e ângulo $120^\circ$	
$a^2$	Fasor de módulo 1 e ângulo $240^\circ$	
$P_{abs}$	Potência absorvida	[W]
$P_{útil}$	Potência útil	[W]
$\Sigma P$	Total de perdas	[W]
$P_{j1}$	Perdas joule no estator	[W]
$P_{j2}$	Perdas joule no rotor	[W]
$P_{fe}$	Perdas no ferro	[W]
$P_{mec}$	Perdas mecânicas	[W]
$P_{sup}$	Perdas suplementares	[W]
$P_{sup(-)}$	Perdas suplementares devida à seqüência negativa	[W]
$P_{supc}$	Perdas suplementares corrigidas ( $k \cdot p_{sup(-)}$ )	[W]
$P_{sNom}$	Perdas suplementares de carga nominal	[W]
$k$	Fator de correção das perdas suplementares	[pu]
$P_{wv}$	Potência absorvida medida entre os terminais W e V do motor	[W]
$P_{uv}$	Potência absorvida medida entre os terminais U e V do motor	[W]
$P_\delta$	Potência no entreferro	[W]
$P_{\delta p}$	Potência no entreferro devido à seqüência positiva	[W]
$P_{\delta n}$	Potência no entreferro devido à seqüência negativa	[W]
$P_e$	Potência total de entrada (igual a $P_{abs}$ )	[W]
$P_{eixo}$	Potência entregue na ponta do eixo	[W]
$R_{eh}$	Resistor ligado entre os terminais U e W do motor	[ $\Omega$ ]
$R_{fe}$	Resistência de perdas no ferro	[ $\Omega$ ]
$R_s$	Resistência de fase do estator	[ $\Omega$ ]
$R_{vw,20}$	Resistência de linha do estator a frio (terminais V e W), referida a $20^\circ C$	[ $\Omega$ ]
$R_{vw,ini}$	Resistência de linha do estator antes de iniciar o ensaio Eh-star	[ $\Omega$ ]
$R_{vw,fim}$	Resistência de linha do estator no final do ensaio Eh-star	[ $\Omega$ ]
$X_0$	Reatância de dispersão ( $X_1 + X_2$ )	[ $\Omega$ ]
$X_1$	Reatância de dispersão do estator	[ $\Omega$ ]
$X_2$	Reatância de dispersão do rotor	[ $\Omega$ ]
$X_m$	Reatância de magnetização	[ $\Omega$ ]
$Z_f$	Impedância de fase do motor	[ $\Omega$ ]
$M_{(+)}$	Torque da máquina alimentada pela seqüência positiva (U-V-W)	[Nm]
$M_{(-)}$	Torque da máquina alimentada pela seqüência negativa (U-W-V)	[Nm]
$M_{AV}$	Torque devido ao atrito e ventilação	[Nm]
$s$	Escorregamento	[pu]
$s_{nom}$	Escorregamento nominal	[pu]
$U_N$	Tensão nominal de linha	[V]
$U_{Nf}$	Tensão nominal de fase	[V]
$U_{uv}$	Tensão de linha entre os terminais U e V do motor	[V]

$U_{vw}$	Tensão de linha entre os terminais V e W do motor	[V]
$U_{wu}$	Tensão de linha entre os terminais W e U do motor	[V]
$U_i_u$	Tensão ‘interna’ da fase U do motor	[V]
$U_i_v$	Tensão ‘interna’ da fase V do motor	[V]
$U_i_w$	Tensão ‘interna’ da fase W do motor	[V]
$U_{i_{uv}}$	Tensão ‘interna’ de linha (sobre $R_{fe}$ ) entre os terminais U e V	[V]
$U_{i_{vw}}$	Tensão ‘interna’ de linha (sobre $R_{fe}$ ) entre os terminais V e W	[V]
$U_{i_{wu}}$	Tensão ‘interna’ de linha (sobre $R_{fe}$ ) entre os terminais W e U	[V]
$U_{i_p}$	Tensão ‘interna’ de fase de seqüências positiva	[V]
$U_{i_n}$	Tensão ‘interna’ de fase de seqüências negativa	[V]
$U_{i_{Lp}}$	Tensão ‘interna’ de linha de seqüências positiva	[V]
$U_{i_{Ln}}$	Tensão ‘interna’ de linha de seqüências negativa	[V]
$V_{abc}$	Vetor de tensões trifásicas	[V]
$V_{012}$	Vetor de tensões trifásicas equivalente em componentes simétricas	[V]
$V_0$	Componente de seqüência zero da tensão	[V]
$V_1$	Componente de seqüência positiva da tensão	[V]
$V_2$	Componente de seqüência negativa da tensão	[V]
$U_{F+}$	Componente de seqüência positiva da tensão de fase	[V]
$U_{F-}$	Componente de seqüência negativa da tensão de fase	[V]
$U_{L+}$	Componente de seqüência positiva da tensão de linha	[V]
$U_{L-}$	Componente de seqüência negativa da tensão de linha	[V]
$I_N$	Corrente nominal de linha	[A]
$I_{Nf}$	Corrente nominal de fase	[A]
$I_{L1}$	Corrente na linha 1 (rede)	[A]
$I_{L2}$	Corrente na linha 2 (rede)	[A]
$I_u$	Corrente na fase U do motor	[A]
$I_v$	Corrente na fase V do motor	[A]
$I_w$	Corrente na fase W do motor	[A]
$I_{v,n}$	Corrente na fase V do motor no ponto ‘n’ ( $n = 1, 2, 3, 4$ )	[A]
$I_{v,1}$	Corrente na fase V do motor no ponto 1 ( $I_{v,1} = 150\% I_{Nf}$ )	[A]
$I_{v,4}$	Corrente na fase V do motor no ponto 4 ( $I_{v,4} = 113\% I_{Nf}$ )	[A]
$I'_u$	Projeção do fasor corrente na fase U no eixo real	[A]
$I'_v$	Projeção do fasor corrente na fase V no eixo real	[A]
$I'_w$	Projeção do fasor corrente na fase W no eixo real	[A]
$I''_u$	Projeção do fasor corrente na fase U no eixo imaginário	[A]
$I''_v$	Projeção do fasor corrente na fase V no eixo imaginário	[A]
$I''_w$	Projeção do fasor corrente na fase W no eixo imaginário	[A]
$I_i_u$	Corrente ‘interna’ na fase U	[A]
$I_i_v$	Corrente ‘interna’ na fase V	[A]
$I_i_w$	Corrente ‘interna’ na fase W	[A]
$I_{i_p}$	Corrente ‘interna’ de seqüência positiva	[A]

$I_{in}$	Corrente ‘interna’ de seqüência negativa	[A]
$I_0$	Corrente a vazio de linha	[A]
$I_{0f}$	Corrente a vazio de fase	[A]
$I_{tN}$	Corrente de teste nominal	[A]
$I_{u_{fe}}$	Corrente na resistência de perdas no ferro na fase U	[A]
$I_{v_{fe}}$	Corrente na resistência de perdas no ferro na fase V	[A]
$I_{w_{fe}}$	Corrente na resistência de perdas no ferro na fase W	[A]
$I_+$	Corrente de seqüência positiva	[A]
$I_-$	Corrente de seqüência negativa	[A]
$I_{1-}$	Corrente de seqüência negativa no estator	[A]
$I_{2-}$	Corrente de seqüência negativa no rotor	[A]
$I_{0n}$	Corrente no estator em vazio com tensão nominal equilibrada	[A]
$I_{1n}$	Corrente no estator em carga com tensão nominal equilibrada	[A]
$I_{2n}$	Corrente no rotor em carga com tensão nominal equilibrada	[A]
$T_{enr,n}$	Temperatura no enrolamento no ponto ‘n’ ( $n = 1, 2, 3, 4$ )	[°C]
$T_{enr,ini}$	Temperatura no enrolamento no ponto 1 ( $I_{v,1} = 150\% I_{Nf}$ )	[°C]
$T_{enr,fim}$	Temperatura no enrolamento no ponto 4 ( $I_{v,4} = 113\% I_{Nf}$ )	[°C]
HVF	Fator de distorção harmônica da tensão	[pu]
$\eta$	Rendimento	[pu]
$\theta$	Ângulo entre os fasores de tensões $U_{uv}$ e $U_{wu}$ (Figura 6.2)	[°]
$\alpha$	ângulo entre o fasor de corrente $I_u$ e o eixo real (Figura 6.3)	[°]
$\beta$	ângulo entre os fasores de corrente $I_u$ e $-I_v$ (Figura 6.3)	[°]
$\gamma$	ângulo entre o fasor de corrente $I_v$ e o eixo imaginário (Figura 6.3)	[°]
$\Re$	eixo dos números reais	
$\Im$	eixo dos números imaginários	

## 1 INTRODUÇÃO

No passado, o valor da eficiência das máquinas elétricas era de importância menor. Atualmente, porém, há uma crescente preocupação mundial com a conservação de energia elétrica, visto que o consumo tem crescido num ritmo mais acelerado do que a própria produção de energia.

Entre os principais consumidores estão as máquinas elétricas. E por isso, há uma preocupação crescente com a eficiência destas máquinas, passando a ser até mesmo alvo de projetos para as aplicações na indústria.

A eficiência de um motor elétrico, também chamada de rendimento, representa o comportamento energético da máquina durante a conversão da potência elétrica absorvida da rede em potência mecânica na ponta do eixo.

$$\eta = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{abs}}} \quad (1.1)$$

Onde

$\eta \rightarrow$  rendimento, normalmente dado em %

$P_{\text{útil}} \rightarrow$  potência mecânica na ponta do eixo, dada em W

$P_{\text{abs}} \rightarrow$  potência elétrica absorvida da rede, dada em W

A medida da eficiência de uma máquina de indução pode também ser executada a partir do conhecimento das perdas totais da máquina, que resulta da soma das perdas determinadas separadamente.

$$\eta = \frac{P_{\text{abs}} - \Sigma P}{P_{\text{abs}}} \quad \text{ou} \quad \eta = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{útil}} + \Sigma P} \quad (1.2)$$

Onde

$\Sigma P \rightarrow$  perdas totais da máquina

De maneira geral, podem-se dividir as perdas totais em cinco componentes:

- Perdas mecânicas (atrito e ventilação)
- Perdas no ferro (histerese e Foucault)
- Perdas Joule no estator
- Perdas Joule no rotor
- Perdas suplementares

As duas primeiras são determinadas através do ensaio em vazio, enquanto que as perdas Joule no estator e rotor são determinadas no ensaio em carga.

Já as perdas suplementares dependem da norma a ser considerada, podendo diferir em muito para um mesmo motor. Inclusive uma mesma norma pode apresentar diferentes métodos que não conduzem necessariamente a um mesmo valor de perdas.

Em outras palavras, as quatro primeiras perdas estão bem definidas em normas, sendo as mesmas em qualquer parte do mundo. Porém, as perdas suplementares têm uma interpretação diferente em algumas normas internacionais, sendo então possível um mesmo motor apresentar diferentes valores de eficiência, conforme o método utilizado para determinar estas perdas.

Com a preocupação de uniformizar um método internacional de medida, foi aberta uma discussão neste início de século entre os principais fabricantes europeus (IEC) e americanos (IEEE - NEMA).

Os europeus acostumados com a consideração de que as perdas suplementares na máquina equivalem a 0,5% da potência absorvida, temem uma queda acentuada na eficiência de suas máquinas caso venham adotar o procedimento da IEEE 112-B, proposto inicialmente para uma padronização.

Em vista disso, propuseram colocar em pauta outro método: eh-star.

Este método foi desenvolvido nos anos 60, por pesquisadores alemães [1][2]. Mas, apesar de ter sido desenvolvido há 4 décadas, ainda não havia sido explorado, até que em 2004 ele foi incluído na proposta de revisão da norma IEC 34-2 (IEC 60034-2), como um terceiro método de ensaio para determinação das perdas suplementares para máquinas de indução trifásicas.

Alguns fabricantes de motores europeus propuseram que este seja adotado como o principal método de ensaio para determinação das perdas suplementares, substituindo o atual que dita um valor percentual de 0,5% da potência absorvida.

Porém, a posição dos europeus contraria a dos demais fabricantes mundiais, dentre eles a WEG, que preferem que a IEC adote o método B da IEEE 112, semelhantemente ao adotado pela NBR 5383, fazendo assim uma padronização entre as principais normas internacionais.

A razão principal deste trabalho então foi trazer à WEG um melhor conhecimento deste novo método de ensaio, para podermos então apoiar ou não a sua implantação.



Neste trabalho destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar ensaios segundo o método eh-star em alguns motores WEG.
- Comparar os resultados do ensaio com outros métodos normalizados.
- Simular o ensaio no programa de cálculos da WEG (M2E).
- Demonstrar a teoria envolvida (anexo B da norma IEC 60034-2-1).

Para expor os objetivos específicos, este trabalho divide-se nos seguintes capítulos:

Cap. 1: introdução geral, apresentando o tema do trabalho e a justificativa do mesmo.

Cap. 2: apresenta um breve relato sobre perdas suplementares, com comentários de alguns pesquisadores a respeito de sua origem. Apresenta também os principais métodos de medição destas perdas.

Cap. 3: apresenta o método eh-star e os procedimentos para realização do ensaio.

Cap. 4: apresenta os ensaios eh-star realizados na WEG, comparando os resultados de perdas suplementares deste método com os resultados determinados pela atual IEC 34-2 e pela norma IEEE 112, método B (NEMA).

Cap. 5: apresenta uma breve revisão de componentes simétricas.

Cap. 6: apresenta o desenvolvimento matemático do método eh-star.

Cap. 7: apresenta uma simulação do ensaio eh-star de um motor 15cv 4p no cálculo de motores de indução da WEG (programa M2E).

Cap. 8: apresenta a proposta de um ensaio alternativo, baseado no método eh-star. Este porém, dispensa a necessidade do resistor  $R_{eh}$ . Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento matemático completo do método proposto.

Cap. 9: apresenta o ensaio do motor 15cv 4p realizado com o método proposto no cap. 8.

Cap. 10: apresenta as considerações finais.

Anexos 1 a 7: apresentam demonstrações que objetivam facilitar o entendimento em alguns pontos do desenvolvimento matemático tanto para o método eh-star (cap. 6) quanto para o método alternativo (cap. 8).

Anexo 8: apresenta o relatório de ensaio eh-star mostrado na referência [2].

Anexo 9: apresenta em uma rotina Mathcad detalhes dos procedimentos para execução do ensaio alternativo, e também toda a marcha de cálculo usada para determinar as perdas suplementares, conforme itens 8.8 e 8.10.

Anexo 10 : apresenta a demonstração da possibilidade de eliminar o fator k.

## **2 PERDAS SUPLEMENTARES**

### **2.1 Introdução**

As perdas suplementares ocorrem em todos os tipos de máquinas elétricas de corrente alternada e acarretam uma redução no rendimento e aquecimento da máquina quando do funcionamento em carga.

Embora este assunto seja objeto de investigação há muitos anos, existem ainda muitas discussões sobre a origem e a avaliação destas perdas.

Segundo [3], as perdas suplementares são devidas à pulsação nos fluxos dispersos e por correntes de Foucault nas laminações e partes metálicas adjacentes.

Segundo [4], as perdas suplementares são devidas à variação da permeância magnética e harmônicas de faixa de fase.

Segundo [5], as perdas suplementares em carga são devidas às variações na distribuição de fluxo e pelas correntes de Foucault. Para ele estas perdas são independentes do fluxo principal.

Segundo [6], as perdas suplementares apresentam duas parcelas, sendo uma em vazio e a outra em carga. Para ele as perdas suplementares em vazio ocorrem devido à variação do fluxo principal, enquanto que as perdas suplementares em carga são devidas aos fluxos dispersos.

Segundo [7], as perdas suplementares também apresentam duas parcelas, porém ele as classifica como de frequência fundamental e alta frequência. Para ele as perdas suplementares de frequência fundamental são devidas às correntes induzidas nos condutores do estator devido ao fluxo disperso na ranhura do estator, incluindo ainda as perdas em outras partes metálicas devido ao fluxo disperso nas partes terminais da máquina, como extremidade do pacote e cabeça de bobina. Já as de alta frequência são perdas induzidas no rotor devido aos harmônicos de força magnetomotriz (fmm) produzidos pela corrente de carga no estator, assim como também perdas induzidas no estator devido aos harmônicos de fmm produzidos pela corrente no rotor.

Segundo [8], as perdas suplementares são entendidas como o acréscimo das perdas de alta frequência quando se estabelece carga ao motor.

## 2.2 Origem das perdas suplementares

As perdas suplementares têm muitas fontes, as quais são um reflexo da natureza não ideal de uma máquina. Elas são difíceis de serem preditas analiticamente e muito mais difíceis ainda de serem medidas diretamente.

A maioria das perdas suplementares é devida ao fluxo de dispersão, principalmente zig-zag, responsável pelas perdas suplementares de alta frequência, que dependem da configuração dos dentes, ranhuras, entreferro e enrolamentos.

Quanto maior a abertura das ranhuras de estator e rotor, maiores serão as perdas por pulsação na região dos dentes próxima ao entreferro. Já quanto maior o entreferro, menores serão as perdas suplementares, porém ter-se-á neste caso uma corrente magnetizante maior, aumentando assim as perdas Joule, podendo estas gerar um aquecimento e uma queda de rendimento maior na máquina do que o ganho com a redução das perdas suplementares. Quanto a reduzir as perdas suplementares através dos enrolamentos deve-se procurar usar passo reduzido (enrolamento camada dupla), ao invés de passo pleno (camada única).

Outra fonte de perdas suplementares nos motores com rotor de alumínio injetado são os possíveis escapes de alumínio que podem ocorrer na parte superior do rotor, formando um filme superficial sobre o rotor tendendo a curto-circuitar as bordas expostas das lâminas. O fluxo pulsante de alta frequência no entreferro criará então correntes parasitas ao longo da superfície condutora, gerando perdas suplementares.

As correntes inter-barras também geram perdas suplementares e uma forma de minimizá-las é através da isolação das barras do rotor. Isto pode ser feito com um processo de fosfatização das ranhuras do rotor com banho de zinco, por exemplo. Este tratamento deverá ser feito obviamente antes da injeção do alumínio.

É importante notar que uma redução forte das perdas suplementares pode não representar um incremento significativo na eficiência do motor, pois estas perdas são uma parcela pequena das perdas totais.

## 2.3 Normas internacionais

As normas JEC 2137 (Japanese Electrotechnical Committee) e IEC 34-2 (International Electrotechnical Commission) atribuem às perdas suplementares um valor correspondente a 0,5% da potência absorvida da rede, independente da potência útil do motor. Porém, verificações baseadas em métodos práticos mostraram que este percentual é pequeno para a maioria dos motores elétricos.

As normas NBR-5383, CSA C390 e IEEE 112-B, determinam inicialmente as perdas suplementares ( $P_{sup}$ ) para seis pontos de carga (25% a 150% da carga nominal). Estas são obtidas pela potência absorvida da rede ( $P_{abs}$ ), subtraídas a potência útil ( $P_{útil}$ ), as perdas Joule no estator ( $P_{j1}$ ) e no rotor ( $P_{j2}$ ), determinadas para cada ponto, e as perdas no ferro ( $P_{fe}$ ) e mecânicas ( $P_{mec}$ ), determinadas no ensaio em vazio. Assim:

$$P_{sup} = P_{abs} - P_{útil} - P_{j1} - P_{j2} - P_{fe} - P_{mec} \quad (2.1)$$

É feita então uma regressão linear das perdas suplementares em função do quadrado do torque da carga em pu do torque nominal, conforme Figura 2.1. Como as perdas suplementares são consideradas nulas em vazio, despreza-se o coeficiente linear B, obtendo-se a reta das perdas suplementares corrigidas ( $P_{supc}$ ) passando pela origem.

O valor das perdas suplementares de carga nominal ( $P_{sup\_nom}$ ), definido para  $T = 1$ , é determinado pelo coeficiente angular A.

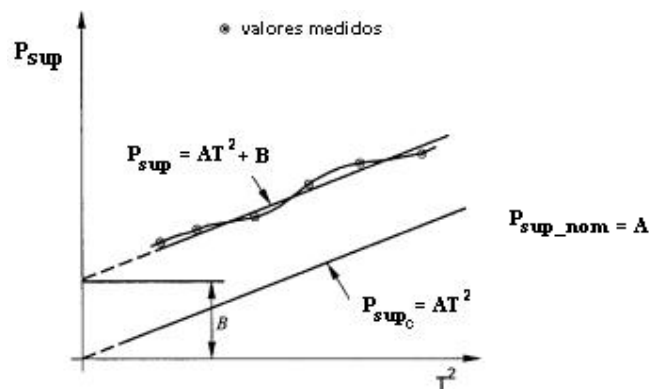


Figura 2.1 – Gráfico das perdas suplementares em função do quadrado da carga

Outro ensaio para determinação das perdas suplementares é o IEEE 112-E [10], conhecido como ensaio de Rotação Reversa e Rotor Removido, que determina respectivamente as perdas suplementares de alta frequência e frequência nominal.

O método E da IEEE não necessita do acoplamento da máquina a um dinamômetro, mas sim de um dispositivo auxiliar que fará girar a máquina em teste no sentido contrário ao do seu campo girante, daí o nome do ensaio de rotação reversa. Porém, como o rotor estará girando à rotação síncrona, as perdas dispersas em carga devidas às harmônicas de campo do rotor não são consideradas, visto que não há corrente fluindo no rotor.

A International Electrotechnical Commission com o propósito de rever a sua maneira de indicar as perdas suplementares, criou em 2002 um projeto de norma

denominado IEC 61972 [11] apresentando dois métodos para determinação das perdas suplementares, o primeiro seguindo uma maneira aproximada à IEEE 112-B e o segundo semelhante à IEC 34-2, porém com uma variação com a potência nominal do motor.

A novidade apresentada pela IEC 61972 em relação a IEEE 112-B está no fato de levar em consideração a variação das perdas no ferro com a carga, visto que a IEEE 112-B mantém constante o valor destas perdas para todos os pontos de carga. O efeito da variação das perdas no ferro com a carga é mais forte nos motores pequenos, que apresentam maior resistência dos enrolamentos.

Em 2004 foi criada a IEC 60034-2, trazendo além dos dois métodos da IEC 61972, mais o método de rotação reversa (cfe IEEE 112-E) e o novo método eh-star. Em setembro de 2007 foi lançada oficialmente a primeira edição, denominanda IEC 60034-2-1 [12].

Esta inclusão foi uma solicitação dos fabricantes Europeus, uma vez que com a mudança na consideração das perdas suplementares, os rendimentos dos seus motores foram reduzidos devido ao aumento no valor destas perdas.

## **2.4 Ensaios para determinação das perdas suplementares**

Ao longo dos anos vários métodos experimentais têm sido desenvolvidos para determinação das perdas suplementares. Em seguida são relacionados alguns deles [13]:

### **2.4.1 Método entrada-saída**

Com o motor acoplado a um dinamômetro, aplica-se tensão nominal e mede-se a potência absorvida da rede, a rotação e o torque na ponta do eixo. Este último dividido pela rotação dá o valor da potência útil do motor. Subtraindo a potência útil da potência absorvida da rede obtêm-se as perdas totais. Destas perdas totais subtraem-se as demais perdas já determinadas previamente, sendo as perdas no ferro e as de atrito e ventilação obtidas no ensaio em vazio e as perdas Joule no estator e no rotor obtidas no ensaio em carga. O resultado final da subtração são as perdas suplementares ( $P_{sup}$ ), conforme (2.1).

Este método é muito impreciso, pois é resultado da diferença entre números grandes, onde um pequeno erro de medição das potências absorvida e útil pode gerar um grande erro nas perdas suplementares. Por isso é indicado apenas para pequenas máquinas onde a eficiência não seja significativa.

### **2.4.2 Método pump-back**

Similar ao método entrada-saída, porém a potência útil é medida a partir de uma máquina idêntica acoplada ao eixo da mesma, usada como gerador.

Este método tem a mesma imprecisão do método entrada-saída e ainda apresenta o inconveniente da necessidade de se obter duas máquinas idênticas, sendo as perdas suplementares determinadas para as duas máquinas. Outro detalhe é que dificilmente as duas máquinas apresentarão na prática as mesmas perdas suplementares.

### **2.4.3 Método do dinamômetro diferencial**

Este método é uma forma modificada do método pump-back, sendo utilizado agora um dinamômetro no lugar do gerador, operando ora como carga, ora como fonte primária para impulsionar o motor em teste. Na primeira etapa o motor em teste impulsiona o dinamômetro e numa segunda etapa eles trocam de função, passando agora o motor a funcionar como gerador.

### **2.4.4 Método do diferencial mecânico**

Este método necessita de duas máquinas idênticas as quais serão acopladas no eixo principal de um diferencial mecânico e conectadas em uma fonte elétrica comum, de modo que girem em direções opostas. A gaiola diferencial permanece estacionária enquanto as duas máquinas estiverem girando na mesma rotação. Quando a gaiola é girada, uma das máquinas acelera e passa a funcionar como gerador e a outra como motor. Ajustando-se a velocidade de rotação da gaiola diferencial, é possível variar a carga. Da potência total de entrada do sistema subtraem-se as demais perdas já conhecidas, obtendo-se então as perdas suplementares. Como as duas máquinas são idênticas, divide-se o valor por dois.

### **2.4.5 Método back-to-back**

Este método necessita de duas máquinas de indução, não necessariamente iguais, acopladas a um dinamômetro fixo a uma chapa estacionária. Os estatores estarão fixados um ao outro e livres para girarem sobre seus próprios mancais. Uma das máquinas opera como gerador com uma velocidade  $n_g$ , enquanto a outra opera como motor com uma velocidade  $n_m$ . As duas velocidades podem ser ajustadas até as carcaças não terem a tendência de girar, o que significa que os torques nos dois acoplamentos são iguais.

#### 2.4.6 Método de curto-circuito AC/DC

Este método consiste de três testes separados:

- Um teste com rotor removido
- Dois testes de curto-circuito: DC ou síncrono e AC ou assíncrono

*Teste com rotor removido* → Retira-se o rotor, colocam-se as tampas e aplica-se uma tensão nos terminais do estator de modo que a corrente de linha seja a corrente de teste

$I_t = \sqrt{I_1^2 - I_0^2}$ . Do valor da potência absorvida subtraem-se as perdas Joule do estator, resultando assim nas perdas suplementares de frequência nominal.

*Teste de curto-circuito DC* → Faz-se passar corrente contínua pelo estator enquanto o rotor é posto a girar na velocidade síncrona. Esta corrente deve corresponder ao valor de pico da corrente alternada de carga. O aumento na potência mecânica requerida para girar o rotor nesta circunstância contém as perdas de frequência nominal e as de alta frequência.

*Teste de curto-circuito AC* → É basicamente o teste de rotor bloqueado. A potência líquida de entrada é assumida como sendo integralmente as perdas na frequência nominal do rotor. As perdas suplementares finais do método serão, então, a soma destes três testes.

#### 2.4.7 Método do calorímetro

Este método pode ser aplicado para máquinas onde o gás de resfriamento, usualmente o ar, é forçado através de passagens específicas. O propósito é avaliar a distribuição da densidade de perdas pela medição dos gradientes de temperatura na máquina, sob várias condições de carga. As perdas suplementares são então calculadas pelos resultados da distribuição da densidade de perdas.

#### 2.4.8 Método de rotação reversa

Este método consiste de duas etapas:

- teste com rotor removido (determina as perdas de frequência nominal -  $P_{sfn}$ )
- teste de rotação reversa (determina as perdas de alta frequência -  $P_{saf}$ )

*Teste com rotor removido* → idêntico ao item 2.4.6, porém se faz as medições para seis pontos de carga (25 a 150%).

*Teste de rotação reversa* → Com uma máquina auxiliar acelera-se o motor em teste até a rotação síncrona e então se alimenta o motor de modo que a força eletromotriz produzida seja contrária ao sentido de rotação do rotor. Para as mesmas seis correntes de teste com rotor removido faz-se as leituras da potência absorvida ( $P_a$ ) e do torque, sendo este último

utilizado para determinar a potência na ponta do eixo do motor ( $P_{\text{eixo}}$ ). Sabendo-se também as perdas mecânicas ( $P_m$ ), as perdas suplementares de alta frequência em cada ponto serão:

$$P_{\text{saf}} = (P_{\text{eixo}} - P_m) - (P_a - P_{\text{sf}} - P_{j1})$$

Finalmente, determinam-se as perdas suplementares do motor pela soma das parcelas de frequência nominal e alta frequência:

$$P_{\text{sup}} = P_{\text{sf}} + P_{\text{saf}}$$

#### **2.4.9 Método eh-star**

Este método se baseia na alimentação monofásica de uma máquina trifásica com ligação das fases em estrela e com um resistor, denominado  $R_{\text{eh}}$ , conectado entre dois terminais da máquina. Esta configuração equivale a ligar a máquina a uma rede trifásica desequilibrada. Depois de quatro décadas ele foi incorporado à Norma IEC 60034-2-1 [13].

Este método é o tema central desta dissertação e será então visto em detalhes.

### **2.5 Conclusão**

Devido à dificuldade em se identificar a origem das perdas suplementares é difícil estabelecer regras para a determinação da eficiência de uma máquina. A escolha do teste a ser realizado depende da exatidão desejada, o tipo e o tamanho da máquina envolvida e os equipamentos de teste disponíveis (fontes, dinamômetro ou máquina auxiliar).



### 3 MÉTODO DE ENSAIO EH-STAR

O prenome EH, vem do alemão Einphasig mit Hilfswiderstand, que significa monofásico com resistência auxiliar. O sufixo *star* se deve ao fato de que os enrolamentos do estator devem ser obrigatoriamente ligados em estrela durante o teste.

#### 3.1 Introdução

O método de ensaio eh-star para determinação das perdas suplementares foi desenvolvido em 1967 pelos alemães Jordan, Richter e Röder [1], e se aplica a motores de indução trifásicos com rotor de gaiola.

O motor não necessita ser acoplado a um dinamômetro ou máquina auxiliar. Durante o teste ele é submetido a uma tensão trifásica desequilibrada, resultante do acoplamento de um resistor  $R_{eh}$  entre dois terminais do motor e o desligamento de uma das fases da rede, após a mudança da chave 'S' da posição 1 para 2, conforme Figura 3.1 [12]:

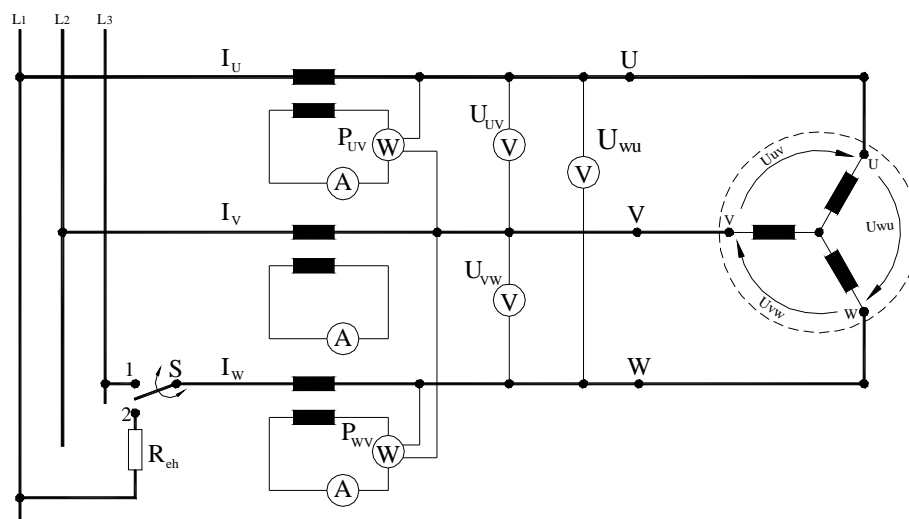


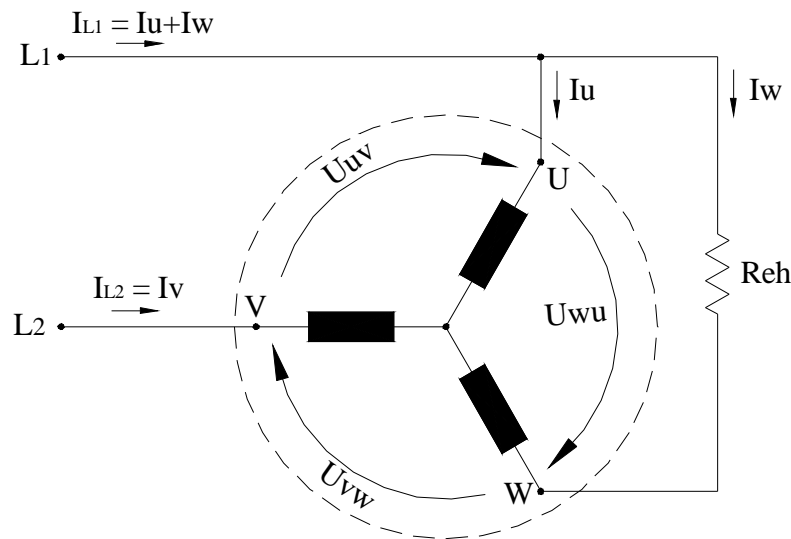
Figura 3.1 – Circuito elétrico para o ensaio eh-star

O torque eletromagnético da máquina alimentada assimetricamente pode ser determinado considerando a máquina alimentada por duas fontes simétricas, uma no sentido de giro (seqüência positiva) e outra no sentido contrário (seqüência negativa).

O torque eletromagnético varia fortemente com a corrente no estator, indicando que a seqüência negativa faz o papel da carga na ponta do eixo, ou seja, apesar de a máquina estar funcionando em vazio, o torque eletromagnético produzido pela seqüência positiva deve vencer mais que o torque de atrito e ventilação [1].

### 3.2 Alimentação desequilibrada

Após a mudança da chave ‘S’ da posição 1 para 2, pode-se redesenhar o circuito sem os componentes de medição, como mostra a Figura 3.2:



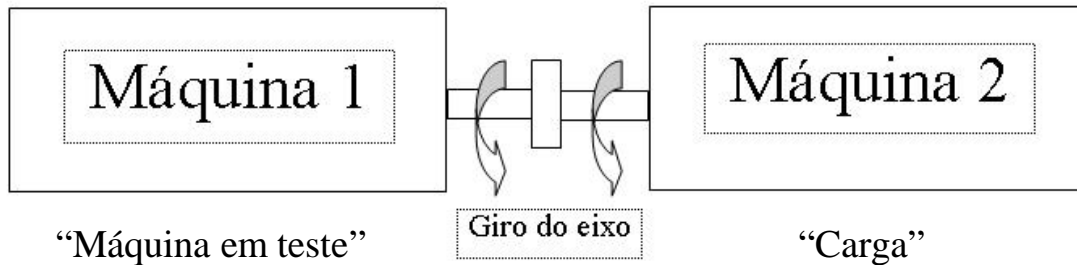
**Figura 3.2 – Circuito simplificado após a mudança da chave S para a posição 2**

O motor fica ligado a duas fases do sistema trifásico, que é o equivalente a ligá-lo a uma fonte monofásica. Nesta situação, surgirão em seus terminais três tensões desequilibradas, correspondendo à alimentação trifásica assimétrica a qual, pela regra das componentes simétricas, pode ser decomposta em três sistemas simétricos: sequência positiva, sequência negativa e sequência zero, onde:

- A corrente de sequência positiva gera no motor um torque com escorregamento próximo de zero (vazio), pois não há carga aplicada na ponta do eixo.
- A corrente de sequência negativa gera um torque com escorregamento próximo de dois (região de freio na curva torque x rotação), simulando assim condições de carga mesmo com o motor em vazio.
- A corrente de sequência zero não existe, pois o motor está ligado em estrela e com o neutro em aberto, conforme indicado no item 6.4.5.5 da IEC 60034-2-1 [12].

A máquina alimentada assimetricamente pode ser considerada então, como duas máquinas de indução equivalentes, acopladas ao mesmo eixo, em que uma é alimentada pela componente direta (sequência positiva), operando com escorregamento “s” e a outra

alimentada pela componente inversa (seqüência negativa) operando com um escorregamento “2-s” [1]. Na Figura 3.3 estas duas máquinas virtuais estão representadas como nº 1 e nº 2, respectivamente. A máquina alimentada pela componente direta (nº 1) representa a máquina em teste, enquanto que a alimentada pela componente inversa (nº 2) representa a carga aplicada na ponta do eixo.



**Figura 3.3 – Máquinas virtuais simulando a máquina sob teste eh-star**

Considerando  $T_{(+)}$  o torque da máquina nº 1, alimentada pelo sistema de seqüência positiva (U-V-W), e  $T_{(-)}$  o torque da máquina nº 2, alimentada pelo sistema de seqüência negativa (U-W-V), o torque eletromagnético resultante será  $T_{(+)} - T_{(-)}$ . Como o motor está funcionando em vazio, este torque suprirá apenas o torque devido ao atrito e ventilação  $T_{AV}$  e o torque das perdas suplementares  $T_S$ , ou seja,  $T_{(+)} - T_{(-)} = T_{AV} + T_S$  [8].

Assim, como no ensaio de rotação reversa da norma IEEE 112-E [11], a carga será simulada com a componente inversa, porém com a vantagem de aqui não se precisar acoplar o motor a outro que o faça girar no sentido contrário ao campo.

No método eh-star a corrente de seqüência positiva não é considerada para o cálculo das perdas suplementares e por isto não deve ser superior a 30% da corrente de seqüência negativa. Este inclusive é um critério de aceitação do ensaio, se não for cumprido em qualquer um dos seis pontos testados deve-se aumentar o valor do resistor  $R_{eh}$  e repetir todos os pontos.

Este percentual não é justificado na norma IEC e em nenhum artigo sobre o método eh-star [1]. Supõe-se que se baseie no fato das perdas suplementares variarem com o quadrado da carga, a qual é simulada pela corrente de seqüência negativa. Como a corrente de seqüência positiva também produz perdas suplementares, as quais não são consideradas, limitar uma proporção máxima de 30% desta corrente em relação à de seqüência negativa limitará a participação dela nas perdas suplementares a apenas 9% do total ( $0,30^2 = 0,09$ ).

### 3.3 Determinação do resistor $R_{eh}$

O valor de  $R_{eh}$  é estimado inicialmente como sendo 20% da impedância de fase do motor ( $Z_f$ ).

$$Z_f = \frac{U_{Nf}}{I_{Nf}} \quad (3.1)$$

$$R_{eh} = 0,2 \cdot Z_f \quad (3.2)$$

Na prática,  $R_{eh}$  deve ser tal que atenda o requisito da corrente de seqüência positiva ser inferior a 30% da corrente de seqüência negativa, ou seja,  $I_+ / I_- < 0,3$ , visto que é esta última quem representa a carga.

### 3.4 Determinação das perdas suplementares

Para se obter as perdas suplementares, determina-se a potência no entreferro ( $P_\delta$ ) considerando simultaneamente as duas máquinas (seqüência positiva e negativa), ou seja, são determinadas  $P_{\delta p}$  e  $P_{\delta n}$ . Para cada máquina é observada uma alimentação trifásica equilibrada, porém dependente da alimentação trifásica original (tensões e correntes desequilibradas). Considerando positivo o sentido de giro do rotor, tem-se:

$$P_\delta = P_{\delta p} - P_{\delta n} \quad (3.3)$$

Obtém-se  $P_\delta$  subtraindo as perdas Joule no estator ( $P_{j1}$ ) e as perdas no ferro ( $P_{fe}$ ) da potência total de entrada ( $P_e$ ). Assim:

$$P_\delta = P_e - P_{j1} - P_{fe} \quad (3.4)$$

A potência no entreferro apresenta duas parcelas: uma referente às perdas Joule no rotor ( $P_{j2}$ ) (proporcional ao escorregamento) e outra referente às perdas suplementares e mecânicas (proporcional ao complemento do escorregamento). Desta última tira-se  $P_{sup}$ :

$$s.P_\delta = P_{j2} \quad (3.5)$$

$$(1-s).P_\delta = P_{sup} + P_{mec} \rightarrow P_{sup} = (1-s).P_\delta - P_{mec} \quad (3.6)$$

No capítulo 6 desta dissertação é mostrado o desenvolvimento matemático do método eh-star, o qual está resumido no anexo B da norma IEC 60034-2-1 [12].

### 3.5 Requerimentos para o teste

- Os enrolamentos do estator devem ser conectados em estrela, sendo os dados nominais por fase do motor, referidos a esta conexão, conforme Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Relação entre tensão e corrente de fase e de linha**

Se for ligação Y	Se for ligação D
$U_{Nf} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} ; I_{Nf} = I_N$	$U_{Nf} = U_N ; I_{Nf} = \frac{I_N}{\sqrt{3}}$

- Com uma frequência nominal fixa, deverá ser possível variar a tensão da rede desde 25% da tensão nominal até um valor capaz de suprir uma corrente de 150% da corrente nominal de fase do motor na ligação estrela.
- A forma de onda da fonte de tensão deve apresentar um HVF (harmonic voltage factor) menor ou igual a 0,015, conforme definido na norma IEC 60034-1.

$$HVF = \sqrt{\sum_{k=2}^{13} \frac{u_k^2}{k}} \leq 0,015 \quad (3.7)$$

$U_k$ : valor rms da tensão da harmônica por unidade da tensão nominal ( $k: 2, \dots, 13$ )

- As perdas no ferro ( $P_{fe}$ ), as perdas mecânicas ( $P_{mec}$ ) (atrito e ventilação), a corrente em vazio ( $I_0$ ) e a resistência de ligação estrela (Y) do estator a 20 °C ( $R_{vw,20}$ ) devem ser pré-determinadas de acordo com o teste em vazio padrão.
- Determina-se então a corrente nominal de teste ( $I_{tN}$ ) através da seguinte relação:

$$I_{tN} = \sqrt{I_{Nf}^2 - I_{0f}^2} \quad (3.8)$$

Nota: No Anexo 1 demonstra-se porque esta consideração é válida.

A Tabela 3.2 apresenta exemplos de determinação da resistência  $R_{eh}$  e da corrente de teste, considerando dois motores 11 kW, 4 pólos, 400 V, 50 Hz,  $I_N = 23$  A,  $I_0 = 12$  A, um com ligação estrela (Y) e outro com ligação triângulo ( $\Delta$ ).

Tabela 3.2 – Exemplo de dois motores 11 kW 4p 400V 50Hz, um Y e outro D

Ligação Y	Ligação D
$U_{Nf} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \text{ V}$	$U_{Nf} = U_N = 400 \text{ V}$
$I_{Nf} = I_N = 23 \text{ A}$	$I_{Nf} = \frac{I_N}{\sqrt{3}} = \frac{23}{\sqrt{3}} = 13,3 \text{ A}$
$I_{0f} = I_0 = 12 \text{ A}$	$I_{0f} = \frac{I_0}{\sqrt{3}} = \frac{12}{\sqrt{3}} = 6,9 \text{ A}$
$Z_f = \frac{U_{Nf}}{I_{Nf}} = \frac{231}{23} = 10,0 \Omega$	$Z_f = \frac{U_{Nf}}{I_{Nf}} = \frac{400}{13,3} = 30,0 \Omega$
$R_{eh} = 0,2 \cdot 10,0 = 2,0 \Omega$	$R_{eh} = 0,2 \cdot 30,0 = 6,0 \Omega$
$I_{tN} = \sqrt{I_{Nf}^2 - I_{0f}^2} = \sqrt{23^2 - 12^2} = 19,6 \text{ A}$	$I_{tN} = \sqrt{I_{Nf}^2 - I_{0f}^2} = \sqrt{13,3^2 - 6,9^2} = 11,3 \text{ A}$

### 3.6 Procedimentos de ensaio

- Antes da execução do ensaio eh-star, deverá ser realizado o ensaio em vazio padrão, para determinação da corrente  $I_0$  e das perdas mecânicas e no ferro.
- Monta-se o circuito da Figura 3.1, mede-se a resistência do estator a frio entre os terminais V e W, convertendo-a a temperatura de 20 °C ( $R_{vw,20}$ ).
- Põe-se o motor a girar por 20 minutos sob tensão nominal, com a chave S na posição 1, para estabilizar as perdas em vazio (o ideal seria realizar o teste logo após o ensaio em vazio, pois neste momento as perdas já estão estabilizadas). Mede-se novamente a resistência entre os terminais V e W, que será a resistência inicial do ensaio eh-star ( $R_{vw,ini}$ ).
- O motor é religado em vazio com uma tensão entre 25% e 40% da tensão nominal.
- Após a aceleração do motor, a chave “S” é acionada da posição 1 para 2 e a resistência  $R_{eh}$  começa a atuar entre as fases U e W, passando agora o motor a operar com tensões não simétricas (Figura 3.2).
- Varia-se a tensão de alimentação  $U_{uv}$ , ajustando a corrente na fase V ( $I_v$ ) em porcentagem da corrente de fase nominal, em seis pontos entre 150% e 75% de  $I_{Nf}$ . Inicia-se com a maior corrente, terminando com a menor, para limitar a variação de temperatura, sugerindo-se 150%, 138%, 125%, 113%, 100% e 75% [2].

Nota: A corrente na fase U ( $I_u$ ) é aproximadamente a média entre a menor corrente, na fase W ( $I_w$ ), e a maior corrente, na fase V ( $I_v$ ).

- Para cada ponto mede-se  $I_u$ ,  $I_v$ ,  $I_w$ ,  $U_{uv}$ ,  $U_{vw}$ ,  $U_{wu}$ ,  $P_e$  e a rotação. Esta deverá ficar próxima da rotação nominal. A norma IEC limita a variação do escorregamento em no máximo o dobro do nominal.
- O motor é desligado e mede-se novamente a resistência do estator entre as fases V e W, que será a resistência final do ensaio eh-star ( $R_{vw, fim}$ ).

### 3.7 Rotina de cálculo

Após as medições, os dados obtidos no item 3.6 são processados numa rotina de cálculo Excel [2]. Para uma melhor qualidade nos resultados dos ensaios realizados na WEG, foi desenvolvido pelo departamento de Controle de Qualidade um software para leitura automática dos parâmetros medidos e execução da rotina de cálculo.

A sequência de cálculos para determinação das perdas suplementares está resumidamente colocada no anexo B da norma IEC 60034-2-1 [12]. Já o desenvolvimento matemático com detalhes pode ser observado no capítulo 6 desta dissertação.

As perdas suplementares determinadas para os seis pontos são colocadas num gráfico em função da relação  $(I_- / I_{tN})^2$ , onde  $I_-$  é a corrente de sequência negativa de cada ponto e  $I_{tN}$  é a corrente de teste nominal dada em (3.8), fixa para todos os pontos.

Com uma regressão linear obtém-se a equação  $P_{sup} = a \cdot (I_- / I_{tN})^2 + b$ .

Como as perdas suplementares por definição são nulas em vazio, despreza-se o parâmetro “ $b$ ” e a equação fica  $P_{supc} = a \cdot (I_- / I_{tN})^2$  (perdas suplementares corrigidas).

Assim, para  $(I_- / I_{tN})^2 = 1$ , ou seja,  $I_- = I_{tN}$ , o parâmetro “ $a$ ” determina o valor das perdas suplementares de carga nominal.

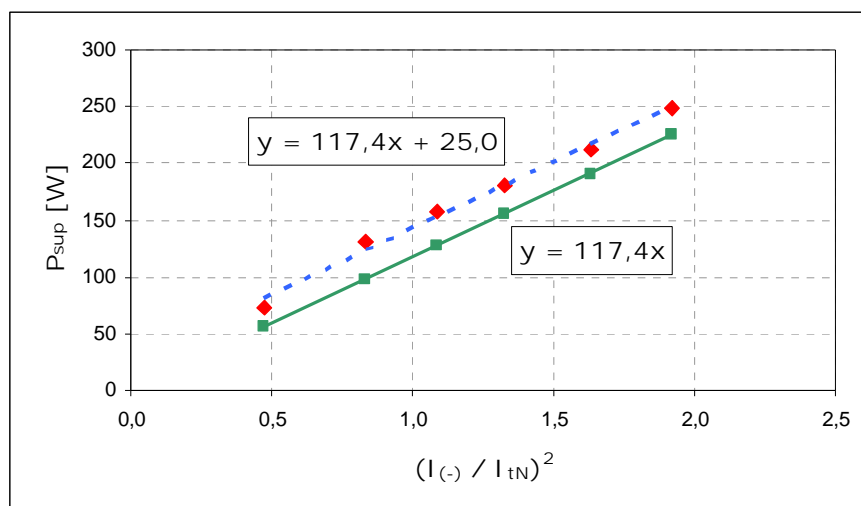
Para exemplificar, considerem-se os resultados de um ensaio eh-star da Tabela 3.3.

**Tabela 3.3 – Exemplo de resultados do ensaio eh-star**

Ponto	$(I_- / I_{tN})^2$	$P_{sup} [W]$	$P_{supc} [W]$
1	1,922	249,1	225,6
2	1,630	212,6	191,4
3	1,324	181,3	155,4
4	1,088	157,3	127,6
5	0,836	131,4	98,1
6	0,475	72,4	55,8

O gráfico  $(I_- / I_{tN})^2 \times P_{sup}$  na Figura 3.4, mostra a linha de tendência tracejada. A linha cheia representa a reta das perdas suplementares corrigidas ( $P_{supc}$ ), ou seja, com  $b = 0$ .

Neste exemplo, as perdas suplementares nominais são de 117,4 W. As perdas suplementares corrigidas ( $P_{supc}$ ) da Tabela 3.3 foram obtidas pelo produto de  $(I_- / I_{tN})^2$  por 117,4, que é o coeficiente angular da reta.



**Figura 3.4 – Gráfico  $(I_{(-)} / I_{tN})^2 \times P_{sup}$  referente ao exemplo da Tabela 3.2**

Nota: No capítulo 6 pode-se verificar que o método eh-star faz uma correção no valor das perdas suplementares, considerando apenas a parcela devida à sequência negativa. Esta parcela de perdas é identificada como  $P_{sup(-)}$ .

### 3.8 Conclusão

O método de ensaio eh-star em sua essência se apresenta como uma forma fácil e rápida para determinação das perdas suplementares de um motor de indução trifásico, visto que não necessita acoplar o motor em teste a um dinamômetro ou máquina auxiliar.

Além disso, o método apresenta uma boa conceituação teórica, conforme item 3.4, sendo inclusive fonte de inspiração para a criação de um método alternativo de ensaio, apresentado no capítulo 8 [8].



## 4 ENSAIOS REALIZADOS NA WEG

### 4.1 Introdução

Foram ensaiados na WEG sete diferentes motores de 2 e 4 pólos, com potências entre 1 e 220 cv. Quase todos foram testados com mais de um valor de  $R_{eh}$ , totalizando 31 ensaios, conforme relacionado na Tabela 4.1:

**Tabela 4.1 – Motores testados com método eh-star na WEG**

cv	Pólos	Carcaça	Qtde ensaios
1	IV	80	4
2	IV	90S	6
4	II	100L	8
10	IV	132S	1
15	IV	160M	3
20	IV	160M	3
60	II	225S/M	3
220	IV	355M/L	3
Total =			31

No item 4.3 deste trabalho são mostrados alguns detalhes dos ensaios do motor de 15 cv, 4 pólos, 400/690 V, 50 Hz, carcaça IEC 160M, o qual foi testado com três diferentes valores de  $R_{eh}$ .

### 4.2 Comentários sobre os ensaios realizados na WEG

Para a realização dos ensaios eh-star na WEG, foram adquiridos alguns resistores de potência de 1, 6 e 50 ohms.

Durante a execução dos ensaios foram percebidas algumas dificuldades técnicas que tiveram que ser contornadas, conforme relatadas a seguir:

- A maioria das fontes de alimentação nos laboratórios é composta por um variador de tensão e autotrafo, apresentando uma *zona morta* geralmente entre 140 e 180 V, ou seja, não é possível ajustar a tensão nesta faixa.
- Para a execução do circuito da Figura 3.1, precisou-se modificar a ligação do analisador de potência, diferindo do padrão utilizado nos laboratórios.

- Para a implantação do método eh-star na WEG, cada laboratório precisaria ter um conjunto de resistores de potência.
- Teve-se dificuldade para ajustar a resistência  $R_{eh}$  principalmente nos motores de menor potência. A estimativa inicial de  $R_{eh}$  igual a 20% da impedância de fase do motor para que a corrente de sequência positiva não seja superior a 30% da corrente de sequência negativa se mostrou baixa, sendo necessário aumentar a resistência.
- Devido à necessidade de ajustes de  $R_{eh}$ , os resistores adquiridos não foram suficientes para a realização de todos os ensaios, sendo necessária a utilização de alguns resistores disponíveis nos laboratórios da WEG.

Destaca-se ainda o fato de que, por ser este um ensaio exclusivamente para determinação das perdas suplementares, não exclui nenhum outro ensaio realizado atualmente, visto que ainda se deve fazer o ensaio em carga para determinação das perdas Joule no estator e rotor. Seria, portanto um ensaio complementar e o resultado inserido no cálculo de separação de perdas, para então determinar-se o rendimento.

Outro inconveniente é que este método não é aplicável para motores com três cabos ligados em triângulo (delta), pois conforme já visto, o motor precisa ser obrigatoriamente ligado em estrela para ser ensaiado.

#### **4.3 Ensaio eh-star do motor 15 cv, 4 pólos, 50 Hz, 400/690 V, carcaça IEC 160M**

Com objetivo de mostrar alguns detalhes de um ensaio eh-star, é feita a seguir uma apresentação dos testes realizados com o motor de 15 cv, 4 pólos, 50 Hz, 400/690 V, carcaça IEC 160M.

As correntes a plena carga ( $I_N$ ) e em vazio ( $I_0$ ), as perdas no ferro ( $P_{fe}$ ) e mecânicas ( $P_{mec}$ ), foram obtidas de ensaio padrão (realizado em 400 V, ligação  $\Delta$ ):

$$I_N = 23,15 \text{ A} \quad I_0 = 11,76 \text{ A} \quad P_{fe} = 376,85 \text{ W} \quad P_{mec} = 97,28 \text{ W}$$

Na Tabela 4.2 tem-se o cálculo do resistor  $R_{eh}$ , e também a determinação da corrente de teste nominal  $I_{tN}$  conforme equação (3.8).

**Tabela 4.2 – Parâmetros nominais do motor 15 cv 4p**

$$\begin{aligned}
 U_{Nf} &= U_N = 400 \text{ V} \\
 I_{Nf} &= \frac{I_N}{\sqrt{3}} = \frac{23,15}{\sqrt{3}} = 13,37 \text{ A} \\
 I_{0f} &= \frac{I_0}{\sqrt{3}} = \frac{11,76}{\sqrt{3}} = 6,79 \text{ A} \\
 Z_f &= \frac{U_{Nf}}{I_{Nf}} = \frac{400}{13,37} \approx 30 \Omega \\
 R_{eh} &= 0,2 \cdot 30 = 6 \Omega \\
 I_{tN} &= \sqrt{I_{Nf}^2 - I_{0f}^2} = \sqrt{13,37^2 - 6,79^2} = 11,52 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Com o resistor  $R_{eh}$  de  $6 \Omega$  a relação entre as correntes de seqüência positiva ( $I_+$ ) e negativa ( $I_-$ ), ficou acima de 0,3 no penúltimo e último ponto do ensaio. Acrescentou-se então um resistor de  $1 \Omega$  em série, passando o valor de  $R_{eh}$  para  $7 \Omega$ . Mas ainda assim no último ponto a relação ficou acima de 0,3. Foram acrescentados então mais dois resistores de  $1 \Omega$  em série, passando o valor de  $R_{eh}$  para  $9 \Omega$ . Assim finalmente a relação convergiu para um valor abaixo de 0,3 nos seis pontos de ensaio, conforme Tabela 4.3.

**Tabela 4.3 – Relação entre as correntes de seqüência positiva e negativa nos três ensaios**

Pontos →	1	2	3	4	5	6
$R_{eh} [\Omega]$	$I_+ / I_-$					
6	0,2931	0,2924	0,2939	0,2980	<b>0,3085</b>	<b>0,3393</b>
7	0,2761	0,2760	0,2784	0,2831	0,2926	<b>0,3227</b>
9	0,2575	0,2570	0,2593	0,2629	0,2681	0,2910

Na Figura 4.1 observa-se a disposição inicial do motor 15 cv para o teste eh-star.

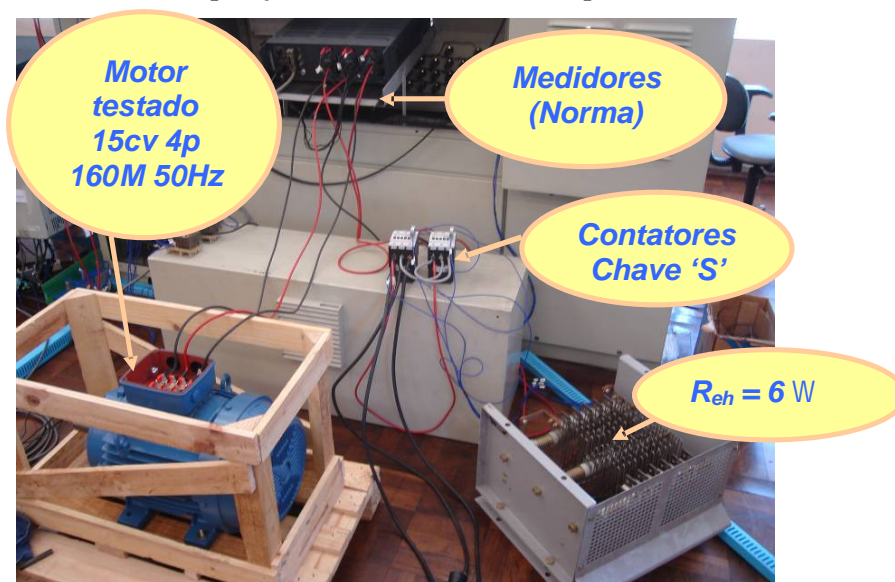


Figura 4.1 – Disposição inicial para o teste eh-star no motor 15 cv ( $R_{eh} = 6 \text{ W}$ )

Na Figura 4.2 observa-se a disposição final do motor 15 cv para o teste eh-star.

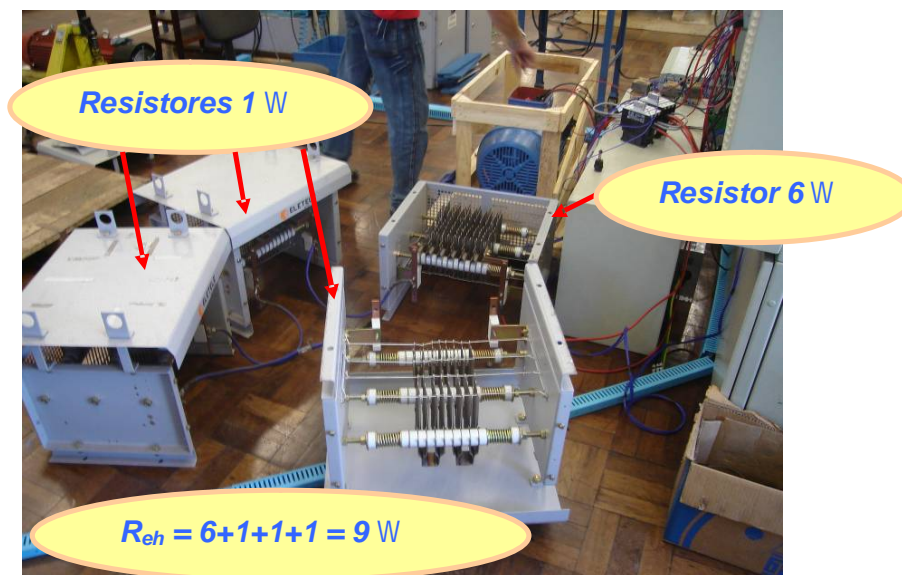


Figura 4.2 – Disposição final para o teste eh-star no motor 15 cv ( $R_{eh} = 9 \text{ W}$ )

As perdas suplementares nos três ensaios referidos na Tabela 4.3 deram respectivamente: 122,3, 109,7 e 117,4 W. Considerando a média de 116,5 W dos três resultados, percebe-se uma variação muito pequena entre os dois primeiros ensaios reprovados e a média (entre 5 e 6%), mostrando que o método tem boa repetibilidade.

$R_{eh}$  de  $9 \Omega$  representa 30% da impedância de fase do motor ( $Z_f = 30 \Omega$ ).

#### 4.4 Resultado do ensaio eh-star do motor 15cv 4p

Na Figura 4.3 podem ser observados os resultados do ensaio eh-star realizado com o motor 15cv 4p utilizando  $R_{eh}$  de  $9 \Omega$ . O valor real de  $R_{eh}$  é verificado ponto a ponto durante o ensaio, sendo determinado pela relação  $U_{wu}/I_{wph}$ , identificados na tabela.

O coeficiente angular da reta (slope A) dá o valor das perdas suplementares para o ponto de carga nominal, que neste ensaio deu 117,37 W.

Esta planilha Excel foi montada pela Darmstadt University, Germany [2].

Para a realização dos ensaios na WEG foi criado um software para realizar a leitura automática dos parâmetros medidos e executar os cálculos.

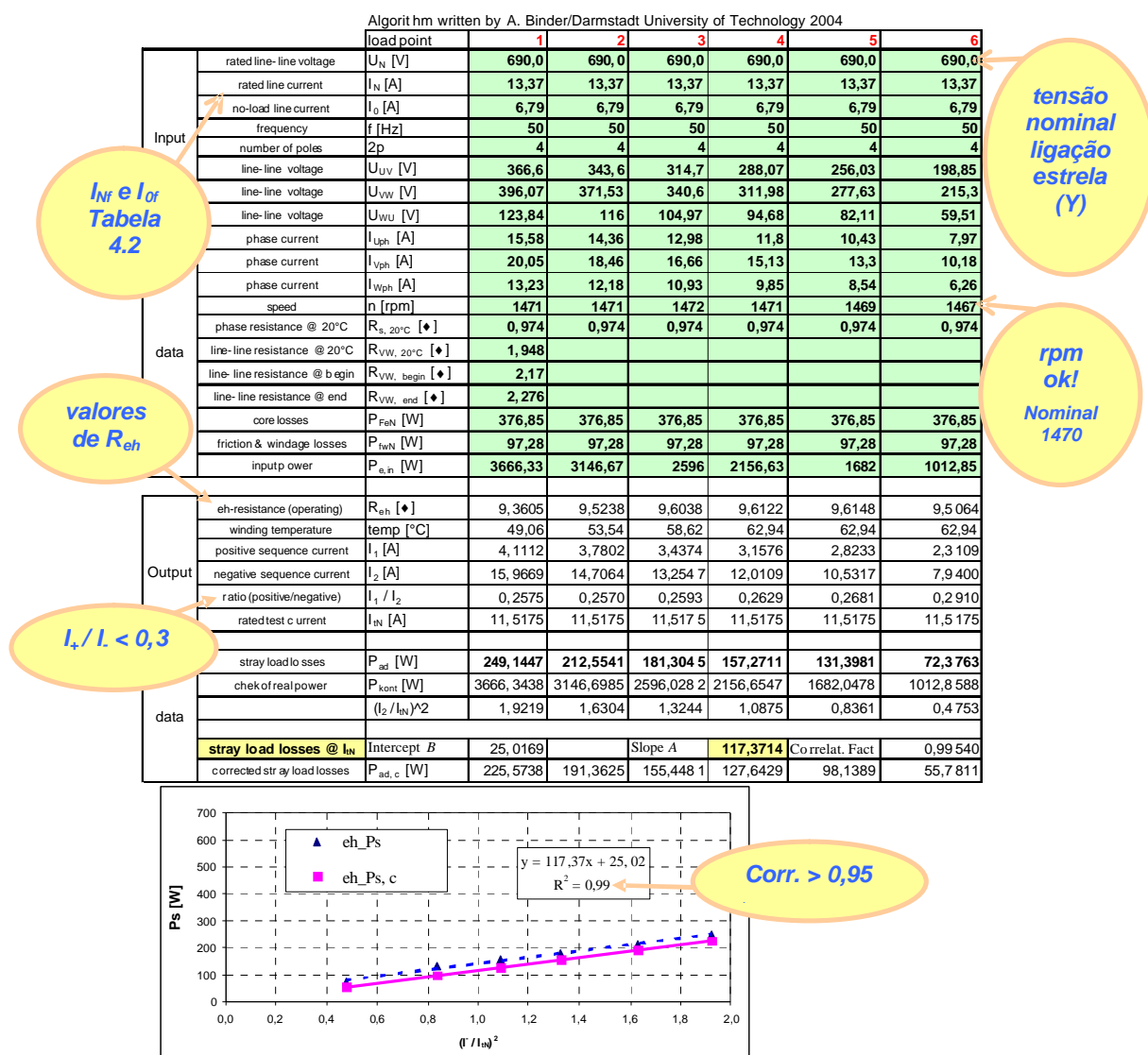


Figura 4.3 – Planilha com resultado do teste eh-star no motor 15cv com  $R_{eh}$  de  $9 \Omega$

Notas:

- 1) As correntes de seqüência positiva e negativa na Figura 4.3 são identificadas como  $I_1$  e  $I_2$ , respectivamente.
- 2) Os critérios de aceitação do ensaio foram atendidos:  $I_+ / I_- < 0,3$  e  $s < 2s_{nom}$  em todos os seis pontos [12] e ainda o coeficiente de correlação da reta  $> 0,95$ .

#### 4.5 Resultados dos ensaios eh-star realizados na WEG

A Tabela 4.4 apresenta um resumo dos 31 ensaios realizados na WEG, onde Ps representa as perdas suplementares de carga nominal.

**Tabela 4.4 – Resumos dos 31 ensaios eh-star realizados na WEG em 2006 e 2007**

Motor	Linha	Nº Série	$Z_f$ [ $\Omega$ ]	$R_{eh}$ [ $\Omega$ ]	$R_{eh} / Z_f$	Ps [W]	$I_+ / I_-$
1cv 4p 80	Alto Rend. 60 Hz	HG00322	127	59,0	46%	15,4	0,54
				68,0	53%	15,7	0,42
				85,0	67%	17,4	0,41
				94,0	74%	16,0	0,41
2cv 4p 90S	Alto Rend. 60 Hz	HF66423	62	15,1	24%	18,4	0,39
				15,1	24%	18,3	0,40
				19,5	32%	17,8	0,34
				23,5	38%	17,5	0,40
				35,5	57%	12,9	0,36
4cv 2p 100L	Normal 60 Hz	HF86085	35	44,3	72%	15,3	0,34
				5,4	15%	47,5	0,46
				6,1	17%	41,3	0,45
				8,0	23%	45,1	0,38
				9,7	28%	41,6	0,36
				12,2	35%	44,1	0,34
				14,8	42%	54,3	0,29
10cv 4p 132S	Alto Rend. 60 Hz	BY58211	14	15,2	43%	40,3	0,30
				15,5	44%	39,7	0,28
				3,1	22%	85,6	0,25
				6,0	20%	122	0,34
15cv 4p 160M	Normal 50 Hz	CB06164	30	7,0	23%	110	0,32
				9,0	30%	117	0,29
				1,56	22%	129	0,33
20cv 4p 160M	Alto Rend. 60 Hz	BY68984	7,1	2,20	31%	130	0,29
				3,20	45%	136	0,26
				0,66	25%	308	0,39
60cv 2p 225S/M	Normal 60 Hz	QB42017	2,7	1,00	37%	322	0,32
				1,37	51%	336	0,26
				0,37	14%	1550	0,42
220cv 4p 355M/L	Normal 50 Hz	QB48422	2,7	1,00	37%	1587	0,24
				1,00	37%	1609	0,24
				1,00	37%	1609	0,24

**Comentários:**

- 1) Os motores de 1 e 2 cv não convergiram para  $I_+ / I_- < 0,30$ , mesmo com  $R_{eh}$  acima de 70% de  $Z_f$ . Apesar disso, as perdas suplementares obtidas pelo método eh-star variaram pouco de um ensaio para outro.
- 2) De maneira geral, o valor da resistência  $R_{eh}$  apresentou pouca influência no resultado das perdas suplementares determinadas pelo método eh-star.

**4.6 Comparativa de perdas suplementares: eh-star x NEMA x IEC 34-2**

A Tabela 4.5 mostra os valores de perdas suplementares determinados pelos métodos eh-star, IEEE 112-B (NEMA) e IEC 34-2 (0,5% da potência absorvida).

As perdas suplementares dos métodos NEMA e IEC foram retiradas do banco de ensaios da WEG Motores, enquanto que as do método eh-star são médias da Tabela 4.4.

**Tabela 4.5 – Comparativo de perdas suplementares de ensaio**

	<b>Alto Rend. (aço silício)</b>			<b>Normal (aço 1006)</b>		
	<b>1cv 4p 80 Alto Rend. 60 Hz</b>			<b>4cv 2p 100L Normal 60 Hz</b>		
	eh-star	NEMA	IEC 34-2	eh-star	NEMA	IEC 34-2
Média Ps [W]	<b>16,1</b>	<b>12,9</b>	<b>4,5</b>	<b>44,2</b>	<b>66,9</b>	<b>17,6</b>
Desvio padrão	<b>0,9</b>	<b>2,3</b>		<b>4,8</b>	<b>17,1</b>	
Qtde ensaios	4	10		8	6	
	<b>2cv 4p 90S Alto Rend. 60 Hz</b>			<b>15cv 4p 160M Normal 50 Hz</b>		
	eh-star	NEMA	IEC 34-2	eh-star	NEMA	IEC 34-2
Média Ps [W]	<b>16,7</b>	<b>14,5</b>	<b>8,8</b>	<b>116,5</b>	<b>90,3</b>	<b>62,9</b>
Desvio padrão	<b>2,2</b>	<b>4,5</b>		<b>6,4</b>	<b>54,0</b>	
Qtde ensaios	6	5		3	8	
	<b>10cv 4p 132S Alto Rend. 60 Hz</b>			<b>60cv 2p 225S/M Normal 60 Hz</b>		
	eh-star	NEMA	IEC 34-2	eh-star	NEMA	IEC 34-2
Média Ps [W]	<b>85,6</b>	<b>46,9</b>	<b>40,8</b>	<b>322</b>	<b>699</b>	<b>237</b>
Desvio padrão	<b>xxx</b>	<b>11,8</b>		<b>14,0</b>	<b>117</b>	
Qtde ensaios	1	6		3	2	
	<b>20cv 4p 160M Alto Rend. 60 Hz</b>			<b>220cv 4p 355M/L Normal 50 Hz</b>		
	eh-star	NEMA	IEC 34-2	eh-star	NEMA	IEC 34-2
Média Ps [W]	<b>131,6</b>	<b>136,5</b>	<b>80,5</b>	<b>1582</b>	<b>1841</b>	<b>851</b>
Desvio padrão	<b>3,9</b>	<b>10,4</b>		<b>29,8</b>	<b>79,0</b>	
Qtde ensaios	3	10		3	3	

**Comentários:**

- 1) A maioria dos motores de Alto Rend. (aço silício) apresentou  $P_{s\_eh\_star} > P_{s\_NEMA}$
- 2) A maioria dos motores Normais (aço 1006) apresentou  $P_{s\_eh\_star} < P_{s\_NEMA}$
- 3) O desvio padrão é menor nos ensaios eh-star do que nos ensaios NEMA.
- 4) O desvio padrão do método IEC é baixo e por isso não foi considerado.
- 5) Conforme já comentado na nota final do capítulo 3, o método eh-star considera apenas a parcela de perdas suplementares devida à sequência negativa, identificada como  $P_{sup(-)}$  no item 6.15 deste trabalho.

**4.7 Conclusão**

Após a realização destes 31 ensaios eh-star na WEG, pode-se destacar os seguintes pontos positivos e negativos a respeito do método:

Pontos Positivos:

- 1) Não é necessário acoplar o motor a um dinamômetro ou máquina auxiliar.
- 2) Fácil e rápida execução do ensaio.
- 3) Boa repetibilidade nos resultados das perdas suplementares para o mesmo motor, mesmo alterando o valor de  $R_{eh}$ .

Pontos Negativos:

- 1) Não é aplicável para motores com três cabos ligados em triângulo (delta).
- 2) Necessidade de ajustar  $R_{eh}$  para que o ensaio atenda o critério de  $I_+ / I_- < 0,30$  em todos os pontos, sendo necessário repetir o teste até que o critério seja atendido.
- 3) Dificuldades para ajustar a tensão em alguns pontos dos ensaios devido à chamada *zona morta* na maioria das fontes dos laboratórios, geralmente entre 140 e 180 V.



## 5 COMPONENTES SIMÉTRICAS

### 5.1 Introdução

O método de componentes simétricas para o estudo de sistemas de potência polifásicos desequilibrados consiste na decomposição dos elementos de tensão ou corrente das fases em parcelas iguais, mas com ângulos de fase diferentes. Desta forma é possível desmembrar o circuito polifásico em  $n$  circuitos monofásicos, supondo válido o princípio da superposição, ou seja, que os circuitos sejam lineares. Isso simplifica em muito o processo de cálculo das grandezas nos sistemas de potência [14].

No caso do sistema trifásico, haverá três componentes: seqüência positiva, seqüência negativa e seqüência zero. Basicamente os valores de seqüência positiva são aqueles presentes durante condições trifásicas equilibradas, representando as correntes e tensões normais observadas nos sistemas de potência durante condições típicas de regime. As grandezas de seqüência negativa medem a quantidade de desequilíbrio existente no sistema de potência. Já as grandezas de seqüência zero estão comumente associadas ao fato de se envolver a terra em condições de desequilíbrio. Pode-se acrescentar ainda que:

- A componente positiva representa o elemento de tensão ou corrente em condições nominais equilibradas, com um sentido de giro positivo (convenção).
- A componente negativa representa o elemento de tensão ou corrente com sentido de giro inverso.
- A componente zero representa o elemento de tensão ou corrente não girante.

### 5.2 Desenvolvimento

Um vetor de tensões trifásicas pode ser expresso por:

$$\mathbf{V}_{abc} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

Com o equivalente em componentes simétricas:

$$\mathbf{V}_{012} = \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

Onde  $V_0$ ,  $V_1$  e  $V_2$  são, respectivamente, as componentes de seqüência zero, positiva e negativa.

A relação entre as tensões pode ser definida por:  $V_{012} = A \cdot V_{abc}$

Onde:

$$A = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

Assim:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} (V_a + V_b + V_c) \\ (V_a + a.V_b + a^2.V_c) \\ (V_a + a^2.V_b + a.V_c) \end{bmatrix}$$

$$\text{Onde } a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = 1 \angle 120^\circ \text{ e } a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = 1 \angle 240^\circ.$$

Multiplicar um fasor por “a” faz girar esse fasor de 120 graus no sentido anti-horário. Quando elevado ao quadrado (operador “a<sup>2</sup>”) faz girar um fasor em 240 graus também no sentido anti-horário, que é equivalente a girar 120 graus no sentido horário.

### 5.3 Exemplos

Para exemplificar, sejam consideradas três condições de tensões trifásicas, onde para cada caso pode-se determinar as componentes de sequência zero, positiva e negativa.

- a) Um sistema trifásico perfeitamente equilibrado

$$V_a = 220 \angle 0^\circ \text{ volts} \quad V_b = 220 \angle -120^\circ \text{ volts} \quad V_c = 220 \angle 120^\circ \text{ volts}$$

$$V_0 = \frac{1}{3} \cdot (V_a + V_b + V_c)$$

$$V_0 = \frac{1}{3} \cdot (220 \angle 0^\circ + 220 \angle -120^\circ + 220 \angle 120^\circ) \quad \mathbf{V_0 = 0 V}$$

$$V_1 = \frac{1}{3} \cdot (V_a + a.V_b + a^2.V_c)$$

$$V_1 = \frac{1}{3} \cdot (220 \angle 0^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 220 \angle -120^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 220 \angle 120^\circ)$$

$$V_1 = \frac{1}{3} \cdot (220 \angle 0^\circ + 220 \angle 0^\circ + 220 \angle 0^\circ) \quad \mathbf{V_1 = 220 \angle 0^\circ V}$$

$$V_2 = \frac{1}{3} \cdot (V_a + a^2 \cdot V_b + a \cdot V_c)$$

$$V_2 = \frac{1}{3} \cdot (220 \angle 0^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 220 \angle -120^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 220 \angle 120^\circ)$$

$$V_2 = \frac{1}{3} \cdot (220 \angle 0^\circ + 220 \angle 120^\circ + 220 \angle 240^\circ) \quad \mathbf{V_2 = 0 \text{ V}}$$

b) Um sistema perfeitamente desequilibrado ou rotação de fases invertida

$$V_a = 220 \angle 0^\circ \text{ volts} \quad V_b = 220 \angle 120^\circ \text{ volts} \quad V_c = 220 \angle -120^\circ \text{ volts}$$

$$V_0 = \frac{1}{3} \cdot (V_a + V_b + V_c)$$

$$V_0 = \frac{1}{3} \cdot (220 \angle 0^\circ + 220 \angle 120^\circ + 220 \angle -120^\circ) \quad \mathbf{V_0 = 0 \text{ V}}$$

$$V_1 = \frac{1}{3} \cdot (V_a + a \cdot V_b + a^2 \cdot V_c)$$

$$V_1 = \frac{1}{3} \cdot (220 \angle 0^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 220 \angle 120^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 220 \angle -120^\circ)$$

$$V_1 = \frac{1}{3} \cdot (220 \angle 0^\circ + 220 \angle 240^\circ + 220 \angle 120^\circ) \quad \mathbf{V_1 = 0 \text{ V}}$$

$$V_2 = \frac{1}{3} \cdot (V_a + a^2 \cdot V_b + a \cdot V_c)$$

$$V_2 = \frac{1}{3} \cdot (220 \angle 0^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 220 \angle 120^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 220 \angle -120^\circ)$$

$$V_2 = \frac{1}{3} \cdot (220 \angle 0^\circ + 220 \angle 0^\circ + 220 \angle 0^\circ) \quad \mathbf{V_2 = 220 \angle 0^\circ \text{ V}}$$

Observa-se assim que para um sistema trifásico perfeitamente desequilibrado (inversão de duas fases), as componentes de sequência positiva e sequência negativa se invertem, passando a ser nula a componente positiva.

c) Uma falta típica da fase A para a terra

$$V_a = 100 \angle 0^\circ \text{ volts} \quad V_b = 220 \angle -120^\circ \text{ volts} \quad V_c = 220 \angle 120^\circ \text{ volts}$$

$$V_0 = \frac{1}{3} \cdot (V_a + V_b + V_c)$$

$$V_0 = \frac{1}{3} \cdot (100 \angle 0^\circ + 220 \angle -120^\circ + 220 \angle 120^\circ) \quad \mathbf{V_0 = 40 \angle 180^\circ V}$$

$$V_1 = \frac{1}{3} \cdot (V_a + a \cdot V_b + a^2 \cdot V_c)$$

$$V_1 = \frac{1}{3} \cdot (100 \angle 0^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 220 \angle -120^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 220 \angle 120^\circ)$$

$$V_1 = \frac{1}{3} \cdot (100 \angle 0^\circ + 220 \angle 0^\circ + 220 \angle 0^\circ) \quad \mathbf{V_1 = 180 \angle 0^\circ V}$$

$$V_2 = \frac{1}{3} \cdot (V_a + a^2 \cdot V_b + a \cdot V_c)$$

$$V_2 = \frac{1}{3} \cdot (100 \angle 0^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 220 \angle -120^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 220 \angle 120^\circ)$$

$$V_2 = \frac{1}{3} \cdot (100 \angle 0^\circ + 220 \angle 120^\circ + 220 \angle 240^\circ) \quad \mathbf{V_2 = 40 \angle 180^\circ V}$$

Observa-se assim que para uma falta da fase A para a terra, a tensão de seqüência positiva é reduzida e a tensão de seqüência negativa fica defasada de 180° com relação à de seqüência positiva. Além disso, aparece a seqüência zero igual à seqüência negativa.

## 5.4 Conclusão

Viu-se nos exemplos “a” e “b” que para um sistema trifásico equilibrado, independente do sentido de giro, tem-se apenas uma componente resultante.

Já no exemplo “c”, quando aparece um desequilíbrio no sistema trifásico, aparecem as demais componentes.

Porém, a componente de seqüência zero só aparece quando envolve a terra em condições de desequilíbrio. Por isso, na execução do teste eh-star o ponto estrela não deve estar conectado a um neutro ou aterrado, conforme item 6.4.5.5 da IEC 60034-2-1 [12].

## 6 DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO DA ROTINA EH-STAR

### 6.1 Introdução

O método eh-star foi desenvolvido tendo como base a alimentação do motor trifásico com tensões desequilibradas. Toda a formulação utilizada pelo método está resumidamente colocada no anexo B da norma IEC 60034-2-1 [12].

São aqui mostrados alguns detalhes do desenvolvimento matemático, o qual não se encontra em literatura, sendo assim realizado exclusivamente para este trabalho.

Nota: Neste capítulo a simbologia utilizada para as tensões e correntes diferem dos outros capítulos com o objetivo de facilitar a indicação da apóstrofe no Equation Editor, passando a ser indicada as referências das fases como subscrito.

### 6.2 Análise das tensões

Como as tensões nos terminais do motor não são equilibradas, deve-se analisar o diagrama de um sistema trifásico desequilibrado conforme mostrado na Figura 6.1:

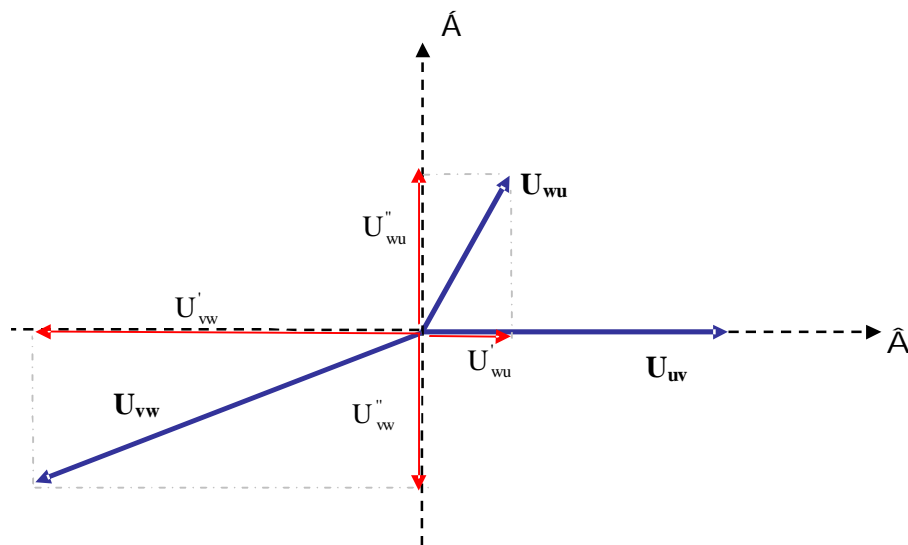
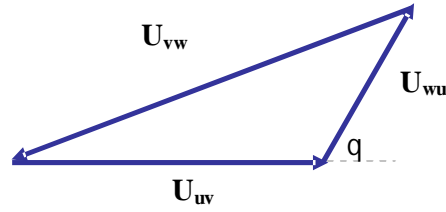


Figura 6.1 – Diagrama vetorial de um sistema trifásico desequilibrado

Seguindo a nomenclatura do anexo B da norma IEC 60034-2-1, as componentes real e imaginária estão representadas com uma e duas apóstrofes, respectivamente.

Tomando a tensão  $U_{uv}$  como referência, pode-se representar o triângulo das tensões conforme Figura 6.2:



**Figura 6.2 – Triângulo das tensões**

a) Para  $U_{uv}$  tem-se:

$$U'_{uv} = U_{uv} \quad (6.1)$$

$$U''_{uv} = 0 \quad (6.2)$$

b) Para  $U_{wu}$  tem-se:

Pela lei dos co-senos tem-se:

$$U_{vw}^2 = U_{uv}^2 + U_{wu}^2 + 2 \cdot U_{uv} \cdot U_{wu} \cdot \cos \theta$$

Mas

$$U_{wu} \cdot \cos \theta = U'_{wu}$$

Então se tem

$$U_{vw}^2 = U_{uv}^2 + U_{wu}^2 + 2 \cdot U_{uv} \cdot U'_{wu}$$

Assim

$$U'_{wu} = \frac{U_{vw}^2 - U_{uv}^2 - U_{wu}^2}{2 \cdot U_{uv}} \quad (6.3)$$

$$U''_{wu} = \sqrt{U_{wu}^2 - U'^2_{wu}} \quad (6.4)$$

c) Para  $U_{vw}$  tem-se:

$$U'_{vw} = -(U_{uv} + U'_{wu}) \quad (6.5)$$

$$U''_{vw} = -U''_{wu} \quad (6.6)$$

### 6.3 Análise das correntes

No circuito da Figura 3.2, a potência entregue pela rede é o produto  $U'_{uv} \cdot I'_v$ , e a potência absorvida pelo circuito é a soma das medidas dos wattímetros com a potência dissipada no resistor  $R_{eh}$ , onde  $P_{R_{eh}} = U_{wu} \cdot I_w$ , assim:

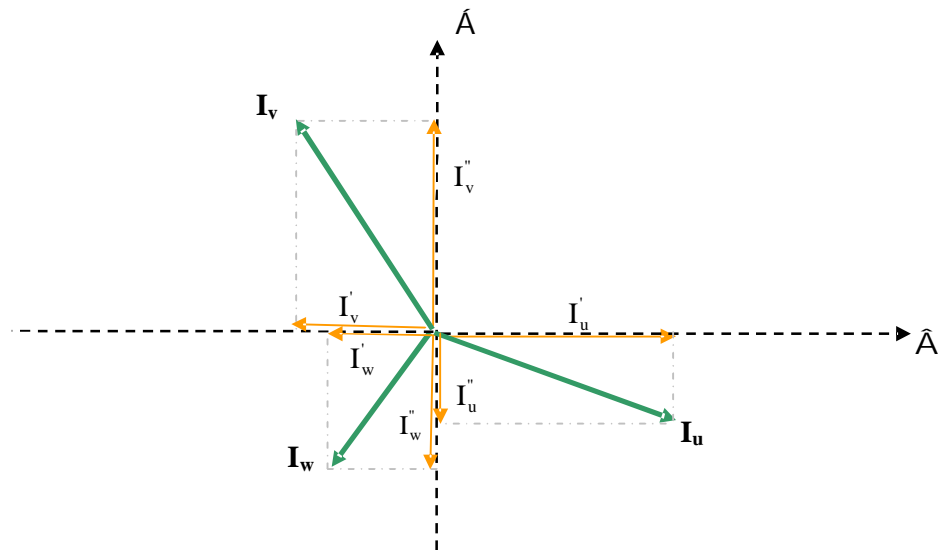
$$U'_{uv} \cdot I'_v = (P_{uv} + P_{wv}) + U_{wu} \cdot I_w$$

Como  $U'_{uv} = U_{uv}$  tem-se

$$I'_v = \frac{(P_{uv} + P_{wv}) + U_{wu} \cdot I_w}{U_{uv}} \quad (6.7)$$

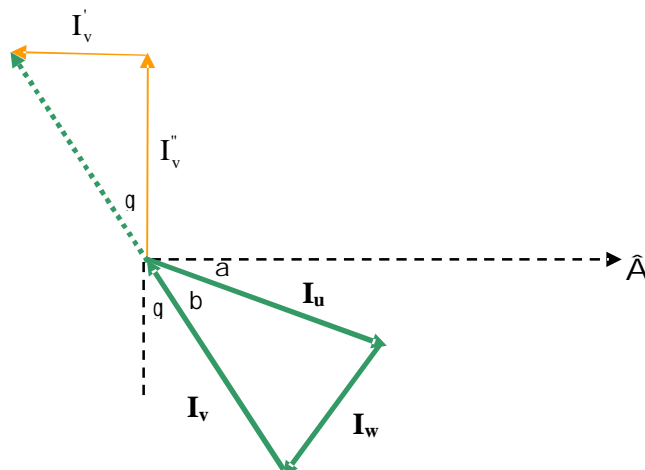
$$I''_v = \sqrt{I_v^2 - I_v'^2} \quad (6.8)$$

Para as demais correntes analisa-se o diagrama vetorial da Figura 6.3:



**Figura 6.3 – Diagrama vetorial das correntes trifásicas**

Tomando o eixo  $\Re$  e o vetor  $I_u$  como referência, pode-se representar o triângulo das correntes conforme Figura 6.4, incluindo as projeções de  $I_v$ , já conhecidas:



**Figura 6.4 – Triângulo das correntes**

Pela lei dos co-senos tem-se:

$$I_w^2 = I_u^2 + I_v^2 - 2 \cdot I_u \cdot I_v \cdot \cos(\beta)$$

Multiplicando e dividindo o último termo da equação por  $I_v$  tem-se

$$I_w^2 = I_u^2 + I_v^2 - 2 \cdot \frac{I_u}{I_v} \cdot I_v^2 \cdot \cos(\beta)$$

Definindo  $k_1 = -\frac{I_u}{I_v} \cdot \cos(\beta)$  obtém-se

$$k_1 = \frac{I_w^2 - I_u^2 - I_v^2}{2 \cdot I_v^2}$$

A projeção do vetor  $I_u$  no eixo  $\Re$  é

$$I_u' = I_u \cdot \cos(\alpha)$$

Por análise trigonométrica verifica-se que

$$\cos(\alpha) = \sin(\beta + \gamma)$$

Assim:

$$I_u' = I_u \cdot \sin(\beta + \gamma)$$

$$I_u' = I_u \cdot (\sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) + \cos(\beta) \cdot \sin(\gamma))$$

$$I_u' = I_u \cdot (\sqrt{1 - \cos^2(\beta)} \cdot \cos(\gamma) + \cos(\beta) \cdot \sin(\gamma))$$

Do triângulo formado pelo vetor  $I_v$  e suas projeções, tem-se:

$$\cos(\gamma) = \frac{I_v''}{I_v} \quad \sin(\gamma) = -\frac{I_v'}{I_v}$$

Então

$$I_u' = I_u \cdot \left( \sqrt{1 - \cos^2(\beta)} \cdot \frac{I_v''}{I_v} - \cos(\beta) \cdot \frac{I_v'}{I_v} \right)$$

$$I_u' = \frac{I_u}{I_v} \cdot \left( \sqrt{1 - \cos^2(\beta)} \cdot I_v'' - \cos(\beta) \cdot I_v' \right)$$

Substituindo  $\cos(\beta)$  definido anteriormente em função da constante  $k_1$

$$\cos(\beta) = -\frac{I_v}{I_u} \cdot k_1$$

$$I_u' = \frac{I_u}{I_v} \cdot \left( \sqrt{1 - \frac{I_v^2}{I_u^2} \cdot k_1^2} \cdot I_v'' + \frac{I_v}{I_u} \cdot k_1 \cdot I_v' \right)$$



$$\begin{aligned}
I_u' &= \frac{I_u}{I_v} \cdot \left( \sqrt{\frac{I_u^2 - I_v^2 \cdot k_l^2}{I_u^2}} \cdot I_v'' + \frac{I_v}{I_u} \cdot k_l \cdot I_v' \right) \\
I_u' &= \frac{I_u}{I_v} \cdot \left( \frac{\sqrt{I_u^2 - I_v^2 \cdot k_l^2}}{I_u} \cdot I_v'' + \frac{I_v}{I_u} \cdot k_l \cdot I_v' \right) \\
I_u' &= \frac{1}{I_v} \cdot \left( \sqrt{I_u^2 - I_v^2 \cdot k_l^2} \cdot I_v'' + k_l \cdot I_v \cdot I_v' \right) \\
I_u' &= \sqrt{\frac{I_u^2 - I_v^2 \cdot k_l^2}{I_v^2}} \cdot \sqrt{I_v^2 - I_v'^2} + k_l \cdot I_v' \\
I_u' &= k_l \cdot I_v' + \sqrt{\left( \frac{I_u^2}{I_v^2} - k_l^2 \right) \cdot (I_v^2 - I_v'^2)} \\
I_u' &= k_l \cdot I_v' + \sqrt{\left( k_l^2 - \frac{I_u^2}{I_v^2} \right) \cdot (I_v'^2 - I_v^2)} \tag{6.9}
\end{aligned}$$

Para a parte imaginária ( $I_u''$ ) tem-se:

$$\begin{aligned}
I_u'' &= -I_u \cdot \cos(\beta + \gamma) \\
I_u'' &= -I_u \cdot (\cos(\beta) \cdot \cos(\gamma) - \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma)) \\
I_u'' &= -I_u \cdot \left( \cos(\beta) \cdot \frac{I_v''}{I_v} + \sqrt{1 - \cos^2(\beta)} \cdot \frac{I_v'}{I_v} \right)
\end{aligned}$$

Substituindo  $\cos(\beta)$  em função da constante  $k_l$  e fazendo algumas manipulações algébricas, encontra-se:

$$\begin{aligned}
I_u'' &= -I_u \cdot \left( -\frac{I_v}{I_u} \cdot k_l \cdot \frac{I_v''}{I_v} + \sqrt{\frac{I_u^2 - I_v^2 \cdot k_l^2}{I_u^2}} \cdot \frac{I_v'}{I_v} \right) \\
I_u'' &= k_l \cdot I_v'' - \sqrt{\left( \frac{I_u^2}{I_v^2} - k_l^2 \right)} \cdot I_v'
\end{aligned}$$

De (6.9) pode-se obter:

$$\begin{aligned}
\sqrt{\left( \frac{I_u^2}{I_v^2} - k_l^2 \right)} &= \frac{I_u' - k_l \cdot I_v'}{\sqrt{I_v^2 - I_v'^2}} \\
\sqrt{\left( \frac{I_u^2}{I_v^2} - k_l^2 \right)} &= \frac{I_u' - k_l \cdot I_v'}{I_v''}
\end{aligned}$$

Substituindo na expressão de  $I_u''$  tem-se:

$$\begin{aligned}
 I_u'' &= k_l \cdot I_v'' - \left( \frac{I_u' - k_l \cdot I_v'}{I_v''} \right) \cdot I_v' \\
 I_u'' &= \frac{k_l \cdot I_v''^2}{I_v''} - \frac{I_u' \cdot I_v'}{I_v''} + \frac{k_l \cdot I_v'^2}{I_v''} \\
 I_u'' &= \frac{k_l}{I_v''} \cdot (I_v'^2 + I_v''^2) - \frac{I_u' \cdot I_v'}{I_v''} \\
 I_u'' &= \frac{k_l \cdot I_v''^2 - I_u' \cdot I_v'}{I_v''} \quad (6.10)
 \end{aligned}$$

Agora para a fase W observa-se pelo diagrama:

$$I_u' + I_v' + I_w' = 0 \text{ e } I_u'' + I_v'' + I_w'' = 0$$

Então

$$I_w' = -I_u' - I_v' \quad (6.11)$$

$$I_w'' = -I_u'' - I_v'' \quad (6.12)$$

#### 6.4 Correção da resistência de fase ( $R_s$ ) pela temperatura

A resistência entre os terminais V e W do motor (resistência de linha, também chamada de resistência de ligação) é medida em três momentos:

- 1) Motor a frio, sendo o valor convertido para a temperatura de 20°C ( $R_{vw,20}$ )
- 2) Após uns 20 minutos com o motor funcionando em vazio ligado à rede ( $R_{vw,ini}$ )
- 3) Ao término da medição dos seis pontos do ensaio eh-star ( $R_{vw,fim}$ )

Nota: Com o motor ligado em estrela, a resistência de fase ( $R_s$ ) é igual à metade da resistência de linha ( $R_{vw}$ ).

Com o valor destas resistências, determinam-se as temperaturas do enrolamento no início ( $T_{enr,ini}$ ) e no fim ( $T_{enr,fim}$ ) do ensaio eh-star, conforme demonstrado no Anexo 2.

$$T_{enr,ini} = \frac{R_{vw,ini}}{R_{vw,20}} \cdot 255 - 235 \quad (6.13)$$

$$T_{enr,fim} = \left( \frac{R_{vw,fim}}{R_{vw,20}} \right) \cdot 255 - 235 \quad (6.14)$$

Estas temperaturas são usadas para corrigir o valor da resistência de fase ( $R_s$ ) para os quatro primeiros pontos do ensaio, onde a corrente de referência  $I_v$  varia de 150% a 113% da corrente nominal de fase do motor, conforme item 3.6 deste trabalho. Para os dois últimos pontos (100% e 75%), considera-se a mesma temperatura do quarto ponto,  $T_{\text{enr,fim}}$ , conforme IEC 60034-2-1, item 6.4.5.5.

Para correção da resistência, faz-se uma regressão linear de  $I_v \times T_{\text{enr}}$ , onde:

$I_{v_1}$  e  $T_{\text{enr,ini}}$  são a corrente e a temperatura no primeiro ponto do ensaio ( $I_{v_1} = 150\% I_{\text{Nf}}$ )

$I_{v_4}$  e  $T_{\text{enr,fim}}$  são a corrente e a temperatura no quarto ponto do ensaio ( $I_{v_4} = 113\% I_{\text{Nf}}$ )

A inclinação da reta  $A$  e a intersecção  $B$ , conforme demonstrados no Anexo 3, são:

$$A = \frac{T_{\text{enr,ini}} - T_{\text{enr,fim}}}{I_{v_1} - I_{v_4}} \quad (6.15)$$

$$B = \left( \frac{T_{\text{enr,ini}} + T_{\text{enr,fim}}}{2} \right) - A \cdot \left( \frac{I_{v_1} + I_{v_4}}{2} \right) \quad (6.16)$$

Assim, para os quatro primeiros pontos ( $n = 1, 2, 3, 4$ ) tem-se:

$$T_{\text{enr}(n)} = A \cdot I_{v(n)} + B \quad (6.17)$$

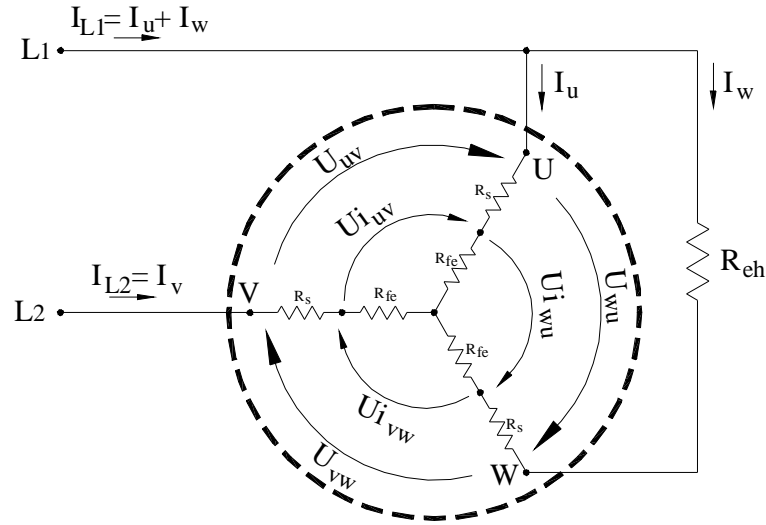
$$R_{s(n)} = R_{s,20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot T_{\text{enr}(n)}) \quad (6.18)$$

Onde  $\alpha_{20} = 0,00393$  é o coeficiente de temperatura do cobre a 20 °C.

## 6.5 Tensões ‘internas’ (sobre $R_{fe}$ e $X_m$ ) – valores de linha

Sendo  $R_s$  a resistência de fase do estator, referida à temperatura do ensaio conforme item 6.4, tem-se uma queda de tensão nesta resistência diretamente proporcional ao valor eficaz da corrente da respectiva fase ( $I_u$ ,  $I_v$  ou  $I_w$ ).

Como o motor está ligado em estrela devem-se considerar dois enrolamentos em série entre dois terminais do motor, cada um com uma queda de tensão diferente em  $R_s$  devido à diferença entre as correntes de cada fase. Subtraindo estas quedas de tensão do valor da tensão de linha, obtém-se a tensão “interna” ( $U_i$ ), que corresponderia no circuito equivalente à tensão sobre a resistência de perdas no ferro ( $R_{fe}$ ). Como pode ser observado na Figura 6.5, este valor corresponde à tensão de linha e não à de fase.



**Figura 6.5 – Tensões internas (sobre  $R_{fe}$  e  $X_m$ ) – valores de linha**

$R_{fe}$  é a resistência de perdas no ferro, calculada a partir da tensão nominal de fase  $U_{Nf}$  e das perdas totais no ferro ( $P_{fe}$ ) determinadas no ensaio em vazio padrão.

$$R_{fe} = \frac{3 \cdot U_{Nf}^2}{P_{fe}} \quad (6.19)$$

Nota: A reatância  $X_m$  não foi representada na Figura 6.5 em paralelo com  $R_{fe}$  para simplificação do desenho.

Assim:

$$U_{i_{uv}} = U_{uv} - R_s \cdot I_u + R_s \cdot I_v \quad \rightarrow \quad U_{i_{uv}} = U_{uv} + R_s \cdot (I_v - I_u) \quad (6.20)$$

$$U_{i_{vw}} = U_{vw} - R_s \cdot I_v + R_s \cdot I_w \quad \rightarrow \quad U_{i_{vw}} = U_{vw} + R_s \cdot (I_w - I_v) \quad (6.21)$$

$$U_{i_{wu}} = U_{wu} - R_s \cdot I_w + R_s \cdot I_u \quad \rightarrow \quad U_{i_{wu}} = U_{wu} + R_s \cdot (I_u - I_w) \quad (6.22)$$

## 6.6 Tensões ‘internas’ de sequência positiva e negativa – valores de linha

Tomando-se a tensão  $U_{i_{uv}}$  como referência, tem-se a tensão de linha definida para a sequência positiva ( $U_{i_{Lp}}$ ) e sequência negativa ( $U_{i_{Ln}}$ ) conforme (6.23) e (6.24):

$$U_{i_{Lp}} = \frac{1}{3} \cdot (U_{i_{uv}} + a \cdot U_{i_{vw}} + a^2 \cdot U_{i_{wu}}) \quad (6.23)$$

$$U_{i_{Ln}} = \frac{1}{3} \cdot (U_{i_{uv}} + a^2 \cdot U_{i_{vw}} + a \cdot U_{i_{wu}}) \quad (6.24)$$

$$\text{Onde } a = e^{j\frac{2\pi}{3}} ; \quad a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$$

### 6.7 Tensões ‘internas’ de seqüência positiva e negativa – valores de fase

A relação entre as tensões de fase de seqüência positiva e negativa ( $U_{i_p}$  e  $U_{i_n}$ ) e as de linha ( $U_{i_{Lp}}$  e  $U_{i_{Ln}}$ ), conforme demonstrado no Anexo 4, será:

$$U_{i_p} = \frac{U_{i_{Lp}}}{\sqrt{3}} \cdot e^{-j\frac{\pi}{6}} \quad (6.25)$$

$$U_{i_n} = \frac{U_{i_{Ln}}}{\sqrt{3}} \cdot e^{j\frac{\pi}{6}} \quad (6.26)$$

### 6.8 Tensões ‘internas’ para cada uma das fases U-V-W

A partir das componentes de seqüência positiva e negativa, podem-se definir as tensões de fase, conforme demonstrado no Anexo 5:

$$U_{i_u} = U_{i_p} + U_{i_n} \quad (6.27)$$

$$U_{i_v} = a^2 \cdot U_{i_p} + a \cdot U_{i_n} \quad (6.28)$$

$$U_{i_w} = a \cdot U_{i_p} + a^2 \cdot U_{i_n} \quad (6.29)$$

### 6.9 Correntes na resistência de perdas no ferro

Para cada uma das fases tem-se:

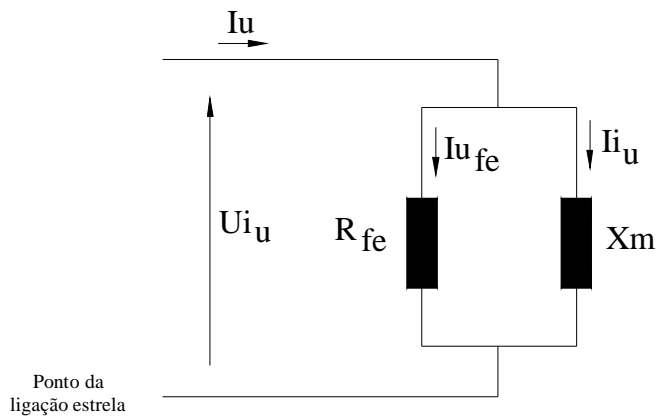
$$I_{u_{fe}} = \frac{U_{i_u}}{R_{fe}} \quad (6.30)$$

$$I_{v_{fe}} = \frac{U_{i_v}}{R_{fe}} \quad (6.31)$$

$$I_{w_{fe}} = \frac{U_{i_w}}{R_{fe}} \quad (6.32)$$

### 6.10 Correntes ‘internas’ para cada uma das fases U-V-W

As correntes ‘internas’ ( $I_i$ ) são responsáveis pela magnetização do motor, ou seja, são as correntes que passam pela reatância  $X_m$  no circuito equivalente por fase, exemplificada na Figura 6.6 pela fase U:



**Figura 6.6 – Corrente na fase U**

$$I_{i_u} = I_u - I_{u_{fe}} \quad (6.33)$$

$$I_{i_v} = I_v - I_{v_{fe}} \quad (6.34)$$

$$I_{i_w} = I_w - I_{w_{fe}} \quad (6.35)$$

### 6.11 Correntes ‘internas’ de seqüência positiva e negativa

Tomando-se a corrente  $I_{i_u}$  como referência, têm-se as correntes de seqüência positiva ( $I_{i_p}$ ) e negativa ( $I_{i_n}$ ) conforme (6.36) e (6.37).

$$I_{i_p} = \frac{1}{3} \cdot (I_{i_u} + a \cdot I_{i_v} + a^2 \cdot I_{i_w}) \quad (6.36)$$

$$I_{i_n} = \frac{1}{3} \cdot (I_{i_u} + a^2 \cdot I_{i_v} + a \cdot I_{i_w}) \quad (6.37)$$

Nota: O valor absoluto da corrente de seqüência positiva ( $I_{i_p}$ ) deve ser menor que 30% do valor absoluto da corrente de seqüência negativa ( $I_{i_n}$ ).

### 6.12 Potência ativa no entreferro

Como se está trabalhando com valores de fase, a potência ativa no entreferro ( $P_\delta$ ) será três vezes a parte real da potência aparente  $U_i \cdot I_i^*$  (produto escalar), considerando as componentes positiva e negativa separadamente. Assim:

$$P_{\delta p} = 3 \cdot \Re\{U_{i_p} \cdot I_{i_p}^*\} = 3 \cdot (U_{i_p}' \cdot I_{i_p}' + U_{i_p}'' \cdot I_{i_p}'') \quad (6.38)$$

$$P_{\delta n} = 3 \cdot \Re\{U_{i_n} \cdot I_{i_n}^*\} = 3 \cdot (U_{i_n}' \cdot I_{i_n}' + U_{i_n}'' \cdot I_{i_n}'') \quad (6.39)$$

De (3.3) tem-se:

$$P_\delta = P_{\delta p} - P_{\delta n} \quad (6.40)$$

### 6.13 Correção das perdas mecânicas

As perdas mecânicas são corrigidas em todos os seis pontos do ensaio, proporcionalmente à relação quadrática da rotação do ponto pela rotação síncrona.

$$P_{mec_c} = \left( \frac{rpm}{rpm_s} \right)^2 \cdot P_{mec} = (1-s)^2 \cdot P_{mec} \quad (6.41)$$

$P_{mec}$  → perdas mecânicas nominais (determinadas no ensaio em vazio padrão)

$P_{mec_c}$  → perdas mecânicas corrigidas para cada ponto

$rpm$  → rotação no ponto de ensaio

$rpm_s$  → rotação síncrona

$s$  → escorregamento [pu]

### 6.14 Perdas suplementares

A potência ativa no entreferro apresenta duas parcelas: uma referente às perdas Joule no rotor ( $P_{j2}$ ) (proporcional ao escorregamento) e outra referente à potência entregue na ponta do eixo ( $P_{eixo}$ ) (proporcional ao complemento do escorregamento). Assim:

$$P_{j2} = s \cdot P_{\delta} = s \cdot (P_{\delta p} - P_{\delta n}) \quad (6.42)$$

$$P_{eixo} = (1-s) \cdot P_{\delta} = (1-s) \cdot (P_{\delta p} - P_{\delta n}) \quad (6.43)$$

Como o motor está funcionando em vazio ( $P_{\text{útil}} = 0$ ), esta última parcela representa a soma das perdas suplementares e mecânicas [9]:

$$(1-s) \cdot (P_{\delta p} - P_{\delta n}) = P_{sup} + P_{mec_c}$$

Assim:

$$P_{sup} = (1-s) \cdot (P_{\delta p} - P_{\delta n}) - P_{mec_c} \quad (6.44)$$

Onde  $P_{mec_c}$  são as perdas mecânicas determinadas em (6.41).

### 6.15 Perdas suplementares devido à seqüência negativa

As perdas suplementares determinadas no ensaio eh-star englobam duas parcelas, uma devida à corrente de seqüência positiva e outra devida à corrente de seqüência negativa. Como a carga está sendo simulada pela seqüência negativa, deve-se considerar apenas esta última parcela de perdas.

O método propõe então um fator  $k$ , como a relação entre o quadrado da corrente de sequência negativa pela soma dos quadrados das duas correntes, conforme (6.45). A definição de  $k$  se baseia na variação das perdas suplementares com o quadrado da corrente.

$$k = \frac{(I_{i_n})^2}{(I_{i_n})^2 + (I_{i_p})^2} \quad (6.45)$$

Dividindo todos os membros de (6.45) por  $(I_{i_n})^2$ , tem-se a expressão de  $k$  conforme aparece no anexo B da norma IEC 60034-2-1 [13].

$$k = \frac{1}{1 + \left( \frac{I_{i_p}}{I_{i_n}} \right)^2} \quad (6.46)$$

Este fator representa uma redução nas perdas suplementares em todos os seis pontos. Assim, a parcela de perdas devida à corrente de sequência negativa ( $P_{\text{sup}(-)}$ ), será o produto do fator  $k$  com as perdas suplementares totais ( $P_{\text{sup}}$ ), conforme (6.47):

$$P_{\text{sup}(-)} = k \cdot P_{\text{sup}} = k \cdot \left\{ (1-s) \cdot (P_{\delta p} - P_{\delta n}) - P_{\text{mec c}} \right\} \quad (6.47)$$

Notas:

- 1) O valor de  $k$  no ensaio do motor 15cv 4p 50 Hz 160M realizado na WEG, variou entre 0,922 e 0,938 nos seis pontos do teste com  $R_{\text{ch}}$  de 9  $\Omega$ , ou seja, a parcela de perdas devida à sequência negativa ficou entre 92,2 e 93,8% do total.
- 2) De acordo com a nota nº 1, a parcela de perdas suplementares devida à corrente de sequência positiva  $(1-k)$ , representa para este motor menos de 8% do total.

### 6.16 Correção no valor das perdas suplementares

Definidas as perdas suplementares devidas à corrente de sequência negativa para os seis pontos, traça-se um gráfico  $(I_- / I_{\text{tN}})^2 \times P_{\text{sup}(-)}$ , onde  $I_-$  é a corrente de sequência negativa do ponto e  $I_{\text{tN}}$  é a corrente de teste, definida na equação (3.8).

Com uma regressão linear obtém-se a equação  $P_{\text{sup}(-)} = a \cdot (I_- / I_{\text{tN}})^2 + b$ .

Como as perdas suplementares por definição são nulas em vazio, despreza-se o parâmetro “ $b$ ” e a equação fica  $P_{\text{supc}} = a \cdot (I_- / I_{\text{tN}})^2$ , onde  $P_{\text{supc}}$  representa o valor das perdas suplementares corrigidas para cada ponto.

Assim, para  $(I_- / I_{\text{tN}})^2 = 1$ , ou seja,  $I_- = I_{\text{tN}}$ , o parâmetro “ $a$ ” determina o valor das perdas suplementares de carga nominal do motor.



Pode ser considerado o exemplo no item 3.7 deste trabalho, supondo que os valores de  $P_{\text{sup}}$  na Tabela 3.3 sejam agora valores de  $P_{\text{sup}(-)}$ .

### **6.17 Conclusão**

A rotina de cálculos para determinação das perdas suplementares pelo método eh-star é um tanto complexa. Por esta razão procurou-se sempre que possível usar ilustrações, indicando ainda algumas demonstrações nos anexos deste trabalho.

Alguns detalhes no desenvolvimento matemático do método eh-star aqui apresentados não se encontra em literatura, sendo feitos exclusivamente para este trabalho.

Informações adicionais são encontradas no anexo B da norma IEC 60034-2-1 [12], que apresenta de forma resumida as principais relações aqui demonstradas.

## 7 SIMULAÇÃO DO ENSAIO EH-STAR NO CÁLCULO DA WEG (M2E)

### 7.1 Introdução

O programa de cálculo de motores de indução de gaiola utilizado pela WEG, chamado M2E (que significa Motor em 2 Eixos, direto e quadratura), de autoria do Sr. João Pacheco [8][9], possibilita calcular o desempenho de um motor elétrico com até seis enrolamentos no estator, alimentado por uma linha monofásica, bifásica ou trifásica (não necessariamente equilibrada). O programa permite considerar diferentes ligações entre os enrolamentos do estator, admitindo também uma impedância externa ligada a um terminal.

Essa versatilidade do programa permite então simular o motor trifásico ligado à rede monofásica e ainda com o resistor  $R_{eh}$  entre dois terminais, conforme Figura 3.2.

### 7.2 Cálculo do motor 15cv, 4 pólos, 50 Hz, 400/690 V, carcaça IEC 160M

Este motor foi testado na WEG, sendo necessário aumentar o resistor  $R_{eh}$  de 6  $\Omega$  para 9  $\Omega$ , passando de 20% para 30% do valor de  $Z_f$  (conforme item 4.3).

Na Tabela 7.1 são apresentados os resultados do ensaio eh-star realizado com o resistor de 9  $\Omega$ , considerando os seis pontos de teste, retirados da planilha na Figura 4.3.

**Tabela 7.1 – Valores do ensaio eh-star do motor 15cv 4p (retirados da Figura 4.3)**

Pontos →	1	2	3	4	5	6
% $I_N$	150%	138%	125%	113%	100%	75%
$I_{ref}$ [A]	<b>20,06</b>	<b>18,45</b>	<b>16,71</b>	<b>15,11</b>	<b>13,37</b>	<b>10,03</b>
<b>Medições</b>						
$I_u$ [A]	15,58	14,36	12,98	11,80	10,43	7,97
<b><math>I_v</math> [A]</b>	<b>20,05</b>	<b>18,46</b>	<b>16,66</b>	<b>15,13</b>	<b>13,30</b>	<b>10,18</b>
$I_w$ [A]	13,23	12,18	10,93	9,85	8,54	6,26
n [rpm]	1471	1471	1472	1471	1469	1467
$P_{sup}$ [W]	249,1	212,5	181,3	157,3	131,4	72,4

#### Notas:

- 1) Os valores de perdas suplementares da Tabela 7.1 correspondem aos valores não corrigidos, que na Figura 4.3 aparecem em negrito ( $P_{ad}$ ).
- 2) A corrente  $I_v$  está destacada em negrito na Tabela 7.1 apenas para ressaltar a sua proximidade com a corrente de referência ( $I_{ref}$ ).

Na Tabela 7.2 são apresentados os resultados da simulação do ensaio eh-star utilizando o programa de cálculo de motores de indução da WEG (programa M2E).

**Tabela 7.2 – Valores de cálculo do motor 15cv 4p simulando eh-star (programa M2E)**

<b>Pontos ®</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
I <sub>u</sub> [A]	15,72	14,74	13,49	12,33	10,97	8,54
I <sub>v</sub> [A]	<b>19,72</b>	<b>18,49</b>	<b>16,92</b>	<b>15,47</b>	<b>13,77</b>	<b>10,73</b>
I <sub>w</sub> [A]	12,97	12,12	10,02	10,02	8,83	6,64
n [rpm]	1471	1471	1470	1470	1469	1467
P <sub>sup</sub> [W]	315,4	279,3	233,4	194,4	153,0	91,1

Na Tabela 7.3 são apresentados os resultados da variação percentual entre os valores de cálculo e ensaio.

**Tabela 7.3 – Variação percentual entre cálculo e ensaio**

<b>Pontos ®</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
I <sub>u</sub> [A]	0,9%	2,6%	3,9%	4,5%	5,2%	7,2%
I <sub>v</sub> [A]	-1,6%	0,2%	1,6%	2,2%	3,5%	5,4%
I <sub>w</sub> [A]	-2,0%	-0,5%	-8,3%	1,7%	3,4%	6,1%
n [rpm]	0,0%	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,0%	0,0%
P <sub>sup</sub> [W]	26,6%	31,4%	28,7%	23,6%	16,4%	25,8%

### 7.3 Conclusão

O baixo percentual na variação entre os resultados das correntes e da rotação do cálculo M2E comparativamente com o ensaio eh-star comprovam a robustez e a versatilidade deste software para cálculo de motores de indução com rotor de gaiola.

Quanto à variação maior nos resultados das perdas suplementares supõe-se que se deva ao fato deste ensaio não considerar as perdas suplementares de frequência nominal, mas sim apenas as de alta frequência [9]. Para considerá-las teria que ser realizado o ensaio de rotor removido, conforme indicado pela norma IEEE-112, método E [10].

## 8 ENSAIO ALTERNATIVO BASEADO NO MÉTODO EH-STAR

### 8.1 Introdução

Conforme já mencionado no capítulo 3, o método eh-star está baseado na alimentação desequilibrada do motor. O sistema trifásico desequilibrado é transformado em dois sistemas equilibrados, um de seqüência positiva com o mesmo sentido de giro do rotor e outro de seqüência negativa com sentido de giro contrário ao do rotor, simulando assim a carga aplicada na ponta do eixo, mesmo com o motor em vazio.

No ensaio eh-star a alimentação trifásica desequilibrada é conseguida utilizando-se um resistor, chamado  $R_{eh}$ , em paralelo com duas fases do motor (ligado em estrela) e com o motor ligado a uma rede monofásica, conforme Figura 3.2.

Em [8] mostra-se que a essência do método de ensaio para determinação das perdas suplementares está em se conseguir a alimentação trifásica desequilibrada sobre o motor. Para demonstrar isso foi desenvolvida uma rotina de cálculo, apresentada em detalhes no item 8.4 deste trabalho de dissertação. Para comprovação prática ele propôs a obtenção da alimentação desequilibrada ligando o motor a duas fases e o neutro de um gerador trifásico, conforme Figura 8.1, dispensando assim a necessidade do resistor. Esta configuração foi montada no laboratório elétrico I da WEG.

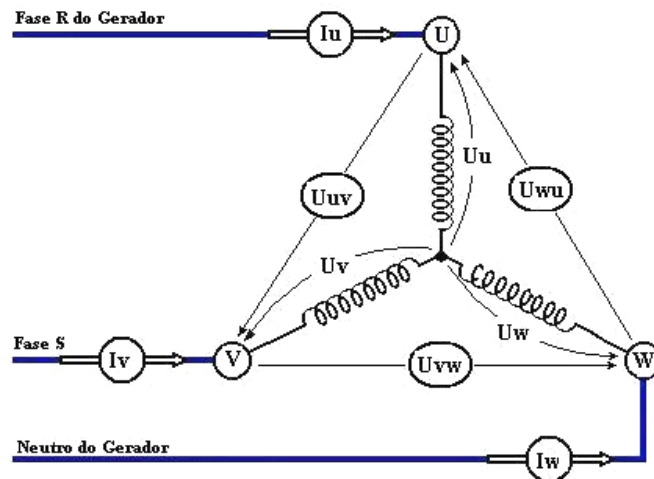


Figura 8.1 - Circuito para o ensaio proposto em [8]

Nota: A utilização de duas fases e o neutro do gerador é apenas uma maneira de se conseguir o desequilíbrio. Poder-se-ia, por exemplo, utilizar um transformador por fase.

## 8.2 Ligação do aparelho de medição Norma

Como a rotina de cálculo desenvolvida é sensível ao sentido de alimentação, foi necessário definir a ligação dos canais do aparelho de medição Norma aos cabos do gerador e aos terminais do motor conforme segue:

- Canal 1 → Entrada: fase R do gerador Saída: cabo U1 do motor
- Canal 2 → Entrada: fase S do gerador Saída: cabo V1 do motor
- Canal 3 → Entrada: neutro do gerador Saída: cabo W1 do motor

## 8.3 Dados preliminares

Semelhantemente ao ensaio eh-star, é preciso realizar previamente o ensaio em vazio para determinação da corrente ( $I_0$ ) e das perdas mecânicas ( $P_{mec}$ ) e no ferro ( $P_{fe}$ ).

## 8.4 Desenvolvimento matemático

O desenvolvimento desta nova rotina para determinação das perdas suplementares de um motor trifásico a partir da alimentação desequilibrada, realizada pelo Sr. João Pacheco, foi consequência deste trabalho de dissertação, visto que ele foi envolvido diretamente no entendimento do método eh-star (cap. 6). O Sr. João Pacheco presta assessorias à WEG e é autor de diversos documentos técnicos, os quais, porém são internos à empresa.

### 8.4.1 Linha trifásica desequilibrada

O estudo do comportamento de um motor trifásico alimentado por uma linha trifásica desequilibrada é facilitado pelo emprego das componentes simétricas. Estas são definidas como de sequência positiva, sequência negativa e sequência zero da grandeza a elas associadas (tensão ou corrente).

No caso em estudo a soma fasorial das tensões ou correntes trifásicas é nula, tendo como consequência a não existência da sequência zero.

### 8.4.2 Componentes simétricas

Seja  $G$  uma grandeza trifásica definida por suas três componentes  $G_1$ ,  $G_2$  e  $G_3$ , de módulos  $g_1$ ,  $g_2$  e  $g_3$ , conforme Figura 8.2:

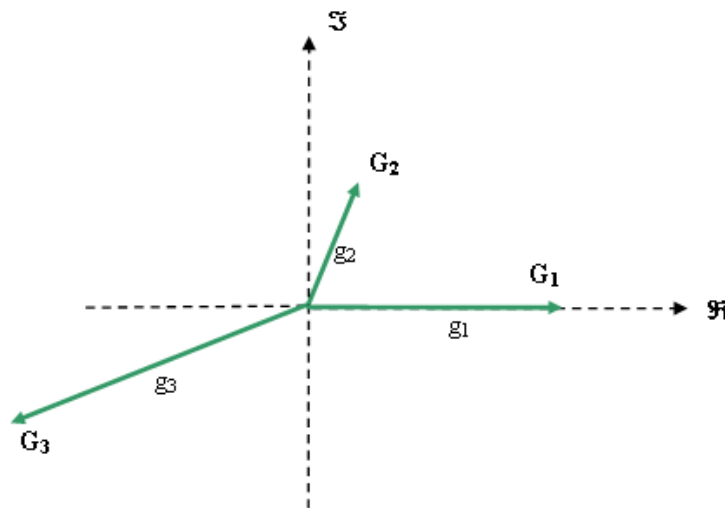


Figura 8.2 – Grandeza trifásica  $G$  com componentes  $G_1$ ,  $G_2$  e  $G_3$

As componentes de seqüências positiva e negativa são definidas em (8.1) e (8.2):

$$G_+ = \frac{1}{3}(G_1 + G_2 / \theta + G_3 \cdot \theta) \quad (8.1)$$

$$G_- = \frac{1}{3}(G_1 + G_2 \cdot \theta + G_3 / \theta) \quad (8.2)$$

Onde:

$$\theta = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad \frac{1}{\theta} = e^{-j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (8.3)$$

Podem ser observadas as seguintes relações:

$$1 + \theta + \frac{1}{\theta} = 0 \quad \theta^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = \frac{1}{\theta} \rightarrow \frac{1}{\theta^2} = \theta \quad (8.4)$$

Notas:

- 1) Comparando (8.1) com (6.23) percebe-se que em [8] adotou-se o sentido de giro positivo contrário ao do método eh-star. Isto, porém, não é relevante.
- 2) Também há uma troca de notação de ' $\alpha$ ' para ' $\theta$ '.

#### 8.4.3 Cálculo dos módulos das componentes de seqüência positiva e negativa

É interessante que os módulos das seqüências positiva ( $g_+$ ) e negativa ( $g_-$ ) sejam calculados em função apenas dos módulos das componentes  $g_1$ ,  $g_2$  e  $g_3$ .

Como o produto de uma grandeza  $G$  pelo seu conjugado complexo  $G^*$  corresponde ao quadrado do seu módulo, tem-se:

$$g_+^2 = (G_+) \cdot (G_+)^* \quad g_-^2 = (G_-) \cdot (G_-)^* \quad (8.5)$$

Desenvolvendo para  $g_+^2$  tem-se:

$$g_+^2 = \frac{1}{9} (G_1 + G_2 / \theta + G_3 \cdot \theta) \cdot (G_1^* + G_2^* \cdot \theta + G_3^* / \theta)$$

$$g_+^2 = \frac{1}{9} (G_a + G_b \cdot \theta + G_c / \theta) \quad (8.6)$$

Onde

$$G_a = G_1 \cdot G_1^* + G_2 \cdot G_2^* + G_3 \cdot G_3^*$$

$$G_b = G_1 \cdot G_2^* + G_2 \cdot G_3^* + G_3 \cdot G_1^*$$

$$G_c = G_1 \cdot G_3^* + G_2 \cdot G_1^* + G_3 \cdot G_2^*$$

Substituindo  $\theta$  e  $1/\theta$  definidos em (8.3) tem-se:

$$G_b \cdot \theta = (G_1 \cdot G_2^* + G_2 \cdot G_3^* + G_3 \cdot G_1^*) \cdot \left( -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

$$G_c / \theta = (G_1 \cdot G_3^* + G_2 \cdot G_1^* + G_3 \cdot G_2^*) \cdot \left( -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

Considerando a soma  $G_b \cdot \theta + G_c / \theta$  separada em duas partes,  $\Sigma_1$  e  $\Sigma_2$ , tem-se:

$$\Sigma_1 = -\frac{1}{2} (G_1 \cdot G_2^* + G_2 \cdot G_3^* + G_3 \cdot G_1^* + G_1 \cdot G_3^* + G_2 \cdot G_1^* + G_3 \cdot G_2^*) \quad (8.7)$$

$$\Sigma_2 = j \frac{\sqrt{3}}{2} (G_1 \cdot G_2^* + G_2 \cdot G_3^* + G_3 \cdot G_1^* - G_1 \cdot G_3^* - G_2 \cdot G_1^* - G_3 \cdot G_2^*) \quad (8.8)$$

Definindo  $P_a$  e  $P_b$  como:

$$P_a = \frac{1}{9} (G_a + \Sigma_1) \quad (8.9)$$

$$P_b = \frac{1}{9} \Sigma_2 \quad (8.10)$$

De (8.6), (8.9) e (8.10), obtém-se:

$$g_+^2 = P_a + P_b \quad (8.11)$$

Para determinar  $\Sigma_1$ , deve-se lembrar que  $G_1 + G_2 + G_3 = 0$ . Assim, pode-se fazer:

$$(G_1 + G_2 + G_3) \cdot (G_1^* + G_2^* + G_3^*) = 0$$

$$G_1 \cdot G_1^* + G_1 \cdot G_2^* + G_1 \cdot G_3^* + G_2 \cdot G_1^* + G_2 \cdot G_2^* + G_2 \cdot G_3^* + G_3 \cdot G_1^* + G_3 \cdot G_2^* + G_3 \cdot G_3^* = 0$$

$$G_1 \cdot G_2^* + G_2 \cdot G_3^* + G_3 \cdot G_1^* + G_1 \cdot G_3^* + G_2 \cdot G_1^* + G_3 \cdot G_2^* = -(G_1 \cdot G_1^* + G_2 \cdot G_2^* + G_3 \cdot G_3^*)$$

Substituindo em (8.7) tem-se:

$$\Sigma_1 = \frac{1}{2} (G_1 \cdot G_1^* + G_2 \cdot G_2^* + G_3 \cdot G_3^*) \quad (8.12)$$

De (8.9) e (8.12) tem-se:

$$P_a = \frac{1}{9} \left[ (G_1 \cdot G_1^* + G_2 \cdot G_2^* + G_3 \cdot G_3^*) + \frac{1}{2} (G_1 \cdot G_1^* + G_2 \cdot G_2^* + G_3 \cdot G_3^*) \right]$$

$$P_a = \frac{1}{6} (G_1 \cdot G_1^* + G_2 \cdot G_2^* + G_3 \cdot G_3^*) \quad (8.13)$$

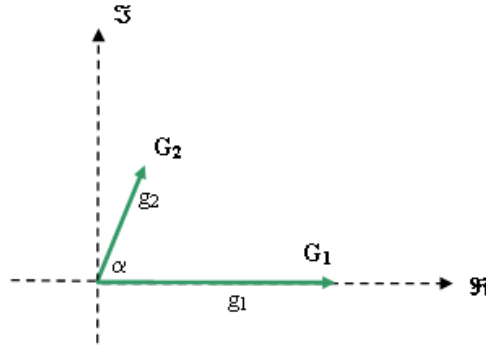
Como o produto de uma grandeza pelo seu complexo conjugado resulta no quadrado do módulo desta grandeza, então:

$$P_a = \frac{1}{6} (g_1^2 + g_2^2 + g_3^2) \quad (8.14)$$

Para determinar a segunda parcela de  $g_+^2$  ( $P_b$ ) deve-se reescrever (8.8):

$$\Sigma_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} [j(G_1 \cdot G_2^* - G_2 \cdot G_1^*) + j(G_2 \cdot G_3^* - G_3 \cdot G_2^*) + j(G_3 \cdot G_1^* - G_1 \cdot G_3^*)] \quad (8.15)$$

Para se prosseguir a demonstração, deve-se analisar a Figura 8.3:



**Figura 8.3 – Detalhe do ângulo  $\alpha$  entre as componentes  $G_1$  e  $G_2$**

Da Figura 8.3 tem-se que:

$$G_1 = g_1 \quad \rightarrow \quad G_1^* = g_1$$

$$G_2 = g_2 \cdot e^{j\alpha} \quad \rightarrow \quad G_2^* = g_2 \cdot e^{-j\alpha}$$

Pode-se desenvolver o primeiro termo entre colchetes de (8.15) conforme segue:

$$j(G_1 \cdot G_2^* - G_2 \cdot G_1^*) = j(g_1 \cdot g_2 \cdot e^{-j\alpha} - g_2 \cdot e^{j\alpha} \cdot g_1)$$

$$j(G_1 \cdot G_2^* - G_2 \cdot G_1^*) = j \cdot g_1 \cdot g_2 \cdot (e^{-j\alpha} - e^{j\alpha})$$

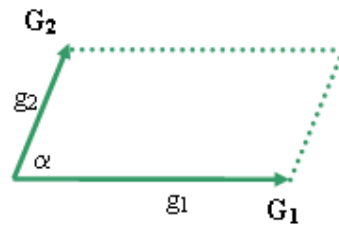
$$j(G_1 \cdot G_2^* - G_2 \cdot G_1^*) = j \cdot g_1 \cdot g_2 \cdot [\cos(-\alpha) + j \cdot \sin(-\alpha) - \cos(\alpha) - j \cdot \sin(\alpha)]$$

$$j(G_1 \cdot G_2^* - G_2 \cdot G_1^*) = j \cdot g_1 \cdot g_2 \cdot [-2 \cdot j \cdot \sin(\alpha)]$$

$$j(G_1 \cdot G_2^* - G_2 \cdot G_1^*) = 2 \cdot g_1 \cdot g_2 \cdot \sin(\alpha) \quad (8.16)$$

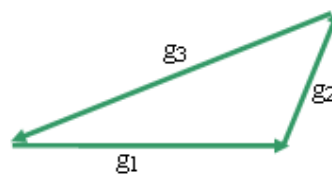
Esta parcela de  $\Sigma_2$  representa o dobro da área do paralelogramo formado pelas componentes  $G_1$  e  $G_2$  mostrado na Figura 8.4.





**Figura 8.4 – Paralelogramo formado pelas componentes  $G_1$  e  $G_2$**

Determina-se então a área do paralelogramo, e para isso deve-se considerar o triângulo formado pelas três componentes  $G_1$ ,  $G_2$  e  $G_3$ , conforme Figura 8.5, o qual representa metade do paralelogramo.

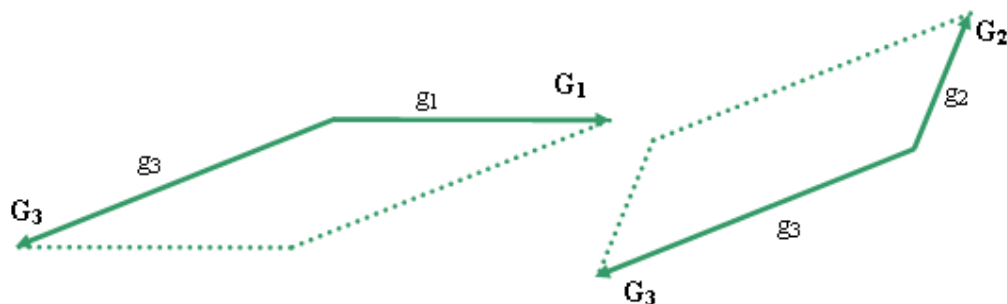


**Figura 8.5 – Triângulo formado pelas componentes  $G_1$ ,  $G_2$  e  $G_3$**

A fórmula de Heron nos fornece a área  $A$  deste triângulo:

$$A = \frac{1}{4} \sqrt{(g_1^2 + g_2^2 + g_3^2)^2 - 2 \cdot (g_1^4 + g_2^4 + g_3^4)} \quad (8.17)$$

Conforme já mencionado, a área do paralelogramo da Figura 8.4 é o dobro da área do triângulo da Figura 8.5. Também foi demonstrado em (8.16) que a primeira parcela entre colchetes de (8.15) representa o dobro da área do paralelogramo, ou seja, quatro vezes a área do triângulo. Raciocínio análogo vale para as outras duas parcelas, considerando os paralelogramos da Figura 8.6.



**Figura 8.6 - Paralelogramos formados pelas componentes  $G_1G_3$  e  $G_2G_3$**

Assim, tem-se de (8.15), (8.16) e (8.17):

$$\Sigma_2 = \frac{\sqrt{3}}{2}(4A + 4A + 4A)$$

$$\Sigma_2 = \frac{3\sqrt{3}}{2} \left( \sqrt{(g_1^2 + g_2^2 + g_3^2)^2 - 2 \cdot (g_1^4 + g_2^4 + g_3^4)} \right)$$

Que pode ser expresso como:

$$\Sigma_2 = \frac{3}{2} \sqrt{3 \cdot (g_1^2 + g_2^2 + g_3^2)^2 - 6 \cdot (g_1^4 + g_2^4 + g_3^4)} \quad (8.18)$$

Pode-se agora determinar Pb substituindo (8.18) em (8.10):

$$Pb = \frac{1}{6} \sqrt{3 \cdot (g_1^2 + g_2^2 + g_3^2)^2 - 6 \cdot (g_1^4 + g_2^4 + g_3^4)} \quad (8.19)$$

Assim, tem-se de (8.11):

$$g_+ = \sqrt{Pa + Pb} \quad (8.20)$$

Para o cálculo da seqüência negativa permuta-se  $\theta$  por  $1/\theta$  e reproduz-se o acima visto. Em consequência, Pa mantém o sinal e Pb o inverte. Assim:

$$g_- = \sqrt{Pa - Pb} \quad (8.21)$$

Assim, usando (8.14), (8.19), (8.20) e (8.21) pode-se calcular os módulos das seqüências positiva e negativa em função somente dos módulos de suas componentes.

#### 8.4.4 Relação entre o valor eficaz e os módulos das componentes

De (8.20) e (8.21), a soma do quadrado das seqüências positiva e negativa vale:

$$g_+^2 + g_-^2 = 2 \cdot Pa$$

De (8.14) tem-se:

$$g_+^2 + g_-^2 = \frac{1}{3} (g_1^2 + g_2^2 + g_3^2)$$

O elemento da direita na expressão anterior é, por definição, o quadrado do valor eficaz (g) da grandeza trifásica G. Assim:

$$g^2 = g_+^2 + g_-^2 \quad (8.22)$$

#### 8.4.5 O ensaio com alimentação desequilibrada

O princípio básico que norteia o ensaio com alimentação desequilibrada é [8]:

$$T_F - T_T = T_S + T_{AV} \quad (8.23)$$

Onde

$T_F \rightarrow$  Torque para frente (devido à seqüência positiva)

$T_T \rightarrow$  Torque para trás (devido à seqüência negativa)

$T_S \rightarrow$  Torque das perdas suplementares

$T_{AV} \rightarrow$  Torque de atrito e ventilação

Isto porque o motor é ensaiado em vazio, ou seja, torque útil nulo.

Considerando os torques em watts síncronos [8], tem-se que:

$$P_S = T_S \cdot (1 - s) \quad P_{mec} = T_{AV} \cdot (1 - s) \quad (8.24)$$

$P_S \rightarrow$  Perdas suplementares [W]

$P_{mec} \rightarrow$  Perdas mecânicas (atrito e ventilação) [W]

$s \rightarrow$  Escorregamento [pu]

Multiplicando (8.23) por  $(1 - s)$ , substituindo (8.24) e isolando  $P_S$ , tem-se:

$$P_S = (T_F - T_T) \cdot (1 - s) - P_{mec} \quad (8.25)$$

O valor de  $P_{mec}$  é obtido do ensaio em vazio padrão e o valor de  $s$  é medido no ensaio eh-star. Falta então determinar  $T_F - T_T$ .

Nota: A parcela  $(T_F - T_T) \cdot s$ , corresponde às perdas Joule no rotor.

#### 8.4.6 Determinação de $T_F$ e $T_T$

O torque das seqüências positiva ( $T_F$ ) e negativa ( $T_T$ ) (em watts síncronos) valem:

$$T_F = P_{e+} - P_{jl+} - P_{fe+} \quad T_T = P_{e-} - P_{jl-} - P_{fe-} \quad (8.26)$$

Sendo

$$P_{jl+} = 3 \cdot R_{f1} \cdot |I_{f+}|^2 \quad P_{jl-} = 3 \cdot R_{f1} \cdot |I_{f-}|^2 \quad (8.27)$$

$$P_{fe+} = 3 \cdot \frac{|V_{f+}|^2}{R_{fe}} \quad P_{fe-} = 3 \cdot \frac{|V_{f-}|^2}{R_{fe}} \quad (8.28)$$

Onde:

$P_e \rightarrow$  Potência de entrada [W]

$P_{jl} \rightarrow$  Perdas Joule no estator [W]

$P_{fe} \rightarrow$  Perdas no ferro [W]

$R_{f1} \rightarrow$  Resistência do estator por fase [ $\Omega$ ] (valor medido)

$R_{fe} \rightarrow$  Resistência de perdas no ferro [ $\Omega$ ] (valor obtido de ensaio)

$I_f \rightarrow$  Corrente no estator por fase [A]

$V_f \rightarrow$  Tensão aplicada por fase [V]

$+$   $\rightarrow$  para seqüência positiva

$-$   $\rightarrow$  para seqüência negativa

As perdas no ferro nominais,  $P_{fe}$ , são determinadas previamente no ensaio em vazio padrão com alimentação equilibrada (mesmo ensaio onde se determinou  $P_{mec}$ ).

A resistência de perdas no ferro é calculada pela equação (6.19).

#### 8.4.7 Determinação das perdas Joule no estator de seqüência positiva e negativa

A Figura 8.7 mostra o circuito com a notação original de tensão e corrente definida por PACHECO [8], constante num material técnico interno à empresa WEG (isto, porém é irrelevante, visto que todo o desenvolvimento é apresentado neste trabalho de dissertação).

Semelhantemente à Figura 8.1 e à Figura 3.2, os enrolamentos do estator estão ligados em estrela, porém a metodologia desenvolvida independe da ligação, podendo ser também empregada para o motor ligado em triângulo.

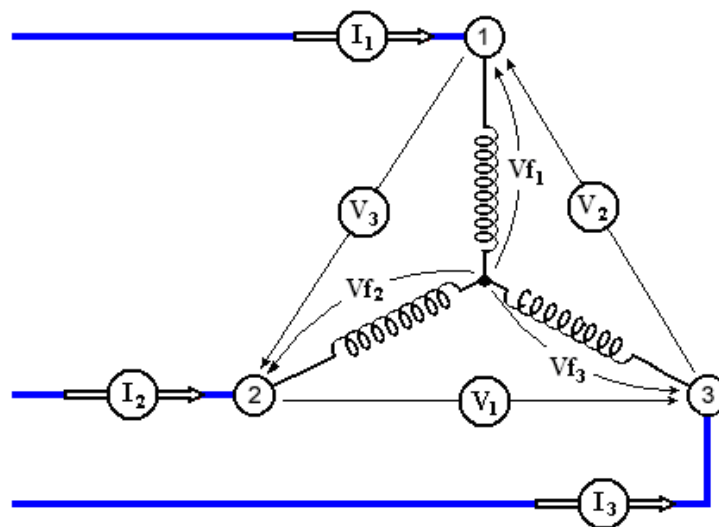


Figura 8.7 - Circuito original proposto em [8]

A Figura 8.7 apresenta as seguintes correspondências com a Figura 8.1:

$I_1, I_2, I_3 \rightarrow I_u, I_v, I_w$

$V_1, V_2, V_3 \rightarrow U_{vw}, U_{wu}, U_{uv}$

Notas:

- 1) Na Figura 8.7 o índice da tensão corresponde ao índice da corrente oposta.
- 2) Na Figura 8.1 as letras do índice da tensão são complementares à da corrente.
- 3) Todos os desenvolvimentos neste capítulo seguirão os índices da Figura 8.7

Para contemplar o fato de esta nova rotina ser independente da ligação do motor ser em estrela ou triângulo (delta), deve-se substituir na equação (8.27) os valores de fase pelos de linha, visto que estes é que são medidos.

No Anexo 6 é demonstrada a relação entre as resistências de fase e de linha (comumente chamada de resistência de ligação) para os circuitos em estrela e triângulo. É demonstrado também que considerando a resistência de ligação e a corrente de linha, as perdas Joule no estator ( $P_{jl}$ ) independem da ligação. Assim, de (8.27) tem-se:

$$P_{jl+} = 1,5 \cdot R_l \cdot |I_+|^2 \quad P_{jl-} = 1,5 \cdot R_l \cdot |I_-|^2 \quad (8.29)$$

Onde

$I \rightarrow$  Corrente nos terminais da linha [A].

$R_l \rightarrow$  Resistência entre dois terminais do estator [ $\Omega$ ] (comumente chamada de resistência de ligação).

#### 8.4.8 Determinação das perdas no ferro de seqüência positiva e negativa

Da mesma forma que foi feito para as perdas Joule no estator, deve-se substituir a tensão de fase pela de linha na equação (8.28).

No Anexo 7 é demonstrada a relação entre os módulos das tensões de fase  $|V_f|$  e de linha  $|V|$  para as seqüências positiva e negativa de um sistema trifásico equilibrado.

$$|V_{f+}|^2 = \frac{|V_+|^2}{3} \quad |V_{f-}|^2 = \frac{|V_-|^2}{3} \quad (8.30)$$

Substituindo (8.30) em (8.28) tem-se:

$$P_{fe+} = \frac{|V_+|^2}{R_{fe}} \quad P_{fe-} = \frac{|V_-|^2}{R_{fe}} \quad (8.31)$$

#### 8.4.9 Determinação da diferença $T_F - T_T$

De (8.26) pode-se deduzir que:

$$T_F - T_T = (P_{e+} - P_{e-}) - (P_{jl+} - P_{jl-}) - (P_{fe+} - P_{fe-}) \quad (8.32)$$

Substituindo (8.29) e (8.31) em (8.32) tem-se:

$$T_F - T_T = (P_{e+} - P_{e-}) - 1,5 \cdot (|I_+|^2 - |I_-|^2) \cdot R_l - (|V_+|^2 - |V_-|^2) / R_{fe} \quad (8.33)$$

De (8.22) pode-se deduzir que:

$$i^2 = |I_+|^2 + |I_-|^2 \quad v^2 = |V_+|^2 + |V_-|^2 \quad (8.34)$$

$i \rightarrow$  valor eficaz da corrente

$v \rightarrow$  valor eficaz da tensão

Define-se  $i_\delta^2$  e  $v_\delta^2$  como:

$$i_\delta^2 = |I_+|^2 - |I_-|^2 \quad v_\delta^2 = |V_+|^2 - |V_-|^2 \quad (8.35)$$

Substituindo (8.35) em (8.33) tem-se:

$$T_F - T_T = (P_{e+} - P_{e-}) - 1,5 \cdot i_\delta^2 \cdot R_l - v_\delta^2 / R_{fe} \quad (8.36)$$

Viu-se em 8.4.4 que:

$$g_+^2 + g_-^2 = 2 \cdot Pa \quad (8.37)$$

De (8.20) e (8.21), pode-se definir também a diferença entre  $g_+^2$  e  $g_-^2$ :

$$g_+^2 - g_-^2 = 2 \cdot Pb \quad (8.38)$$

De (8.34) e (8.37) pode-se deduzir que:

$$i^2 = 2 \cdot Pa_i \quad v^2 = 2 \cdot Pa_v \quad (8.39)$$

Sendo  $Pa_i$  e  $Pa_v$  determinados por (8.14):

$$Pa_i = \frac{1}{6} \cdot (i_1^2 + i_2^2 + i_3^2) \quad (8.40)$$

$$Pa_v = \frac{1}{6} \cdot (v_1^2 + v_2^2 + v_3^2) \quad (8.41)$$

De (8.35) e (8.38) pode-se deduzir que:

$$i_\delta^2 = 2 \cdot Pb_i \quad v_\delta^2 = 2 \cdot Pb_v \quad (8.42)$$

Sendo  $Pb_i$  e  $Pb_v$  determinados por (8.19):

$$Pb_i = \frac{1}{6} \sqrt{3 \cdot (i_1^2 + i_2^2 + i_3^2)^2 - 6 \cdot (i_1^4 + i_2^4 + i_3^4)} \quad (8.43)$$

$$Pb_v = \frac{1}{6} \sqrt{3 \cdot (v_1^2 + v_2^2 + v_3^2)^2 - 6 \cdot (v_1^4 + v_2^4 + v_3^4)} \quad (8.44)$$

Onde:

$i_1, i_2, i_3 \rightarrow$  correntes de linha (A)

$v_1, v_2, v_3 \rightarrow$  tensões de linha (V)

Nota: Como a corrente de sequência negativa é maior do que a corrente de sequência positiva pode-se concluir de (8.35) que  $i_s^2$  será negativo.

Para determinar  $T_F - T_T$  em (8.36) falta determinar  $Pe_+ - Pe_-$ , que corresponde à diferença entre as potências de entrada das seqüências positiva e negativa.

#### 8.4.10 Diferença entre as potências de entrada das duas seqüências

A potência complexa total de entrada,  $Se$ , resulta da soma das potências complexas de sequência positiva e negativa,  $Se_+$  e  $Se_-$ , respectivamente, onde:

$$Se_+ = Pe_+ + j \cdot Qe_+ \quad Se_- = Pe_- + j \cdot Qe_- \quad (8.45)$$

A potência ativa de entrada,  $Pe = Pe_+ + Pe_-$ , é obtida diretamente dos valores lidos nos wattímetros. A potência reativa,  $Qe = Qe_+ + Qe_-$ , é calculada por:

$$Qe = \sqrt{|Se|^2 - Pe^2}$$

Onde  $|Se|$  representa a potência aparente.

Defina-se  $q$  como a relação entre a diferença e a soma de  $Se_+$  e  $Se_-$ .

$$q = qr + j \cdot qx = \frac{Se_+ - Se_-}{Se_+ + Se_-} \quad (8.46)$$

Multiplicando o numerador e o denominador de  $q$  por  $(Se_+)^* + (Se_-)^*$ , tem-se:

$$q = \frac{[(Se_+) - (Se_-)] \cdot [(Se_+)^* + (Se_-)^*]}{[(Se_+) + (Se_-)] \cdot [(Se_+)^* + (Se_-)^*]} = \frac{qn}{qd} \quad (8.47)$$

Desenvolvendo  $qn$ , tem-se:

$$\begin{aligned} qn &= (Se_+) \cdot (Se_+)^* - (Se_-) \cdot (Se_-)^* + (Se_+) \cdot (Se_-)^* - (Se_-) \cdot (Se_+)^* \\ qn &= (Se_+) \cdot (Se_+)^* - (Se_-) \cdot (Se_-)^* + (Se_+) \cdot (Se_-)^* - ((Se_+) \cdot (Se_-)^*)^* \\ qn &= (Se_+) \cdot (Se_+)^* - (Se_-) \cdot (Se_-)^* + 2 \cdot \Im\{(Se_+) \cdot (Se_-)^*\} \end{aligned} \quad (8.48)$$

Onde  $\Im$  representa a parte imaginária de um complexo.

De (8.46) e (8.47) nota-se que  $qr$  é proporcional à parte real de  $qn$  enquanto que  $qx$  é proporcional à parte imaginária. Assim:

$$qr = \frac{(Se_+) \cdot (Se_+)^* - (Se_-) \cdot (Se_-)^*}{qd} \quad (8.49)$$

$$qx = \frac{2 \cdot \Im\{(Se_+) \cdot (Se_-)^*\}}{qd} \quad (8.50)$$

Desenvolvendo **qd**, tem-se:

$$\begin{aligned}
 qd &= (Se_+) \cdot (Se_+)^* + (Se_-) \cdot (Se_-)^* + (Se_+) \cdot (Se_-)^* + (Se_-) \cdot (Se_+)^* \\
 qd &= (Se_+) \cdot (Se_+)^* + (Se_-) \cdot (Se_-)^* + (Se_+) \cdot (Se_-)^* + ((Se_+) \cdot (Se_-)^*)^* \\
 qd &= (Se_+) \cdot (Se_+)^* + (Se_-) \cdot (Se_-)^* + 2 \cdot \Re\{(Se_+) \cdot (Se_-)^*\} \quad (8.51)
 \end{aligned}$$

Onde  $\Re$  representa a parte real de um complexo.

Como o produto de uma grandeza pelo seu complexo conjugado resulta no quadrado do módulo desta grandeza, pode-se concluir que **qd** corresponde ao quadrado do módulo da potência complexa total de entrada.

$$qd = [(Se_+) + (Se_-)] \cdot [(Se_+)^* + (Se_-)^*] = Se \cdot Se^* = |Se|^2 \quad (8.52)$$

A potência complexa de entrada para as duas seqüências pode ser escrita como:

$$Se_+ = 3 \cdot (V_{f+}) \cdot (I_{f+})^* \quad Se_- = 3 \cdot (V_{f-}) \cdot (I_{f-})^* \quad (8.53)$$

$V_{f+}$  ;  $I_{f+}$  → tensão e corrente de *fase* de seqüência positiva.

$V_{f-}$  ;  $I_{f-}$  → tensão e corrente de *fase* de seqüência negativa.

Porém, como os valores medidos nos voltímetros e amperímetros são de linha, é interessante ter  $Se_+$  e  $Se_-$  em função destes valores.

No Anexo 7, demonstra-se a relação entre as tensões de fase e de linha para as duas seqüências, baseada na Figura 8.7.

Substituindo as equações (A7.4) e (A7.8) em (8.53) e considerando a igualdade entre as correntes de fase e de linha (circuito em estrela), tem-se:

$$Se_+ = 3 \cdot \left( j \frac{\sqrt{3}}{3} V_+ \right) \cdot (I_+)^* \quad Se_- = 3 \cdot \left( -j \frac{\sqrt{3}}{3} V_- \right) \cdot (I_-)^*$$

Assim

$$Se_+ = j\sqrt{3} \cdot (V_+) \cdot (I_+)^* \quad Se_- = -j\sqrt{3} \cdot (V_-) \cdot (I_-)^* \quad (8.54)$$

$V_+$  ;  $I_+$  → tensão e corrente de *linha* de seqüência positiva.

$V_-$  ;  $I_-$  → tensão e corrente de *linha* de seqüência negativa.

O quadrado do módulo da potência complexa de entrada para as seqüências é:

$$|Se_+|^2 = (Se_+) \cdot (Se_+)^* \quad |Se_-|^2 = (Se_-) \cdot (Se_-)^* \quad (8.55)$$

Substituindo (8.54) em (8.55) tem-se para  $Se_+$ :

$$|Se_+|^2 = (j\sqrt{3} \cdot (V_+) \cdot (I_+)^*) \cdot (-j\sqrt{3} \cdot (V_+)^* \cdot (I_+))$$



$$|\text{Se}_+|^2 = 3 \cdot (\text{V}_+) \cdot (\text{V}_+)^* \cdot (\text{I}_+) \cdot (\text{I}_+)^*$$

Para  $\text{Se}_-$  tem-se:

$$|\text{Se}_-|^2 = (-j\sqrt{3} \cdot (\text{V}_-) \cdot (\text{I}_-)^*) \cdot (j\sqrt{3} \cdot (\text{V}_-)^* \cdot (\text{I}_-))$$

$$|\text{Se}_-|^2 = 3 \cdot (\text{V}_-) \cdot (\text{V}_-)^* \cdot (\text{I}_-) \cdot (\text{I}_-)^*$$

Assim:

$$|\text{Se}_+|^2 = 3 \cdot |\text{V}_+|^2 \cdot |\text{I}_+|^2 \quad |\text{Se}_-|^2 = 3 \cdot |\text{V}_-|^2 \cdot |\text{I}_-|^2 \quad (8.56)$$

Somando e subtraindo (8.34) e (8.35) tem-se:

$$i^2 + i_{\delta}^2 = 2 \cdot |\text{I}_+|^2 \quad v^2 + v_{\delta}^2 = 2 \cdot |\text{V}_+|^2$$

$$i^2 - i_{\delta}^2 = 2 \cdot |\text{I}_-|^2 \quad v^2 - v_{\delta}^2 = 2 \cdot |\text{V}_-|^2$$

Assim:

$$|\text{I}_+|^2 = \frac{i^2 + i_{\delta}^2}{2} \quad |\text{V}_+|^2 = \frac{v^2 + v_{\delta}^2}{2} \quad (8.57)$$

$$|\text{I}_-|^2 = \frac{i^2 - i_{\delta}^2}{2} \quad |\text{V}_-|^2 = \frac{v^2 - v_{\delta}^2}{2} \quad (8.58)$$

Substituindo (8.55), (8.57) e (8.58) em (8.56):

$$(\text{Se}_+) \cdot (\text{Se}_+)^* = 3 \cdot \left( \frac{v^2 + v_{\delta}^2}{2} \right) \cdot \left( \frac{i^2 + i_{\delta}^2}{2} \right) \quad (\text{Se}_-) \cdot (\text{Se}_-)^* = 3 \cdot \left( \frac{v^2 - v_{\delta}^2}{2} \right) \cdot \left( \frac{i^2 - i_{\delta}^2}{2} \right)$$

$$(\text{Se}_+) \cdot (\text{Se}_+)^* = \frac{3}{4} \cdot (v^2 \cdot i^2 + v^2 \cdot i_{\delta}^2 + v_{\delta}^2 \cdot i^2 + v_{\delta}^2 \cdot i_{\delta}^2)$$

$$(\text{Se}_-) \cdot (\text{Se}_-)^* = \frac{3}{4} \cdot (v^2 \cdot i^2 - v^2 \cdot i_{\delta}^2 - v_{\delta}^2 \cdot i^2 + v_{\delta}^2 \cdot i_{\delta}^2)$$

Subtraindo e somando as duas expressões acima, tem-se:

$$(\text{Se}_+) \cdot (\text{Se}_+)^* - (\text{Se}_-) \cdot (\text{Se}_-)^* = \frac{3}{2} \cdot (v^2 \cdot i_{\delta}^2 + v_{\delta}^2 \cdot i^2) \quad (8.59)$$

$$(\text{Se}_+) \cdot (\text{Se}_+)^* + (\text{Se}_-) \cdot (\text{Se}_-)^* = \frac{3}{2} \cdot (v^2 \cdot i^2 + v_{\delta}^2 \cdot i_{\delta}^2) \quad (8.60)$$

Substituindo (8.59) em (8.49) tem-se:

$$\text{qr} = \frac{1,5 \cdot (v^2 \cdot i_{\delta}^2 + v_{\delta}^2 \cdot i^2)}{\text{qd}} \quad (8.61)$$

Substituindo (8.60) em (8.51) tem-se:

$$\text{qd} = 1,5 \cdot (v^2 \cdot i^2 + v_{\delta}^2 \cdot i_{\delta}^2) + 2 \cdot \Re\{(\text{Se}_+) \cdot (\text{Se}_-)^*\} \quad (8.62)$$

Para o desenvolvimento de  $(Se_+).(Se_-)^*$ , tem-se de (8.54):

$$Se_+ = j\sqrt{3} \cdot (V_+) \cdot (I_+)^* \quad (Se_-)^* = j\sqrt{3} \cdot (V_-)^* \cdot (I_-)$$

Então:

$$\begin{aligned} (Se_+) \cdot (Se_-)^* &= -3 \cdot [(V_+) \cdot (I_+)^*] \cdot [(V_-)^* \cdot (I_-)] \\ (Se_+) \cdot (Se_-)^* &= -3 \cdot (V_+) \cdot (V_-)^* \cdot (I_+)^* \cdot (I_-) \\ (Se_+) \cdot (Se_-)^* &= -3 \cdot [(V_+) \cdot (V_-)^*] \cdot [(I_+) \cdot (I_-)^*]^* \end{aligned} \quad (8.63)$$

Para determinar  $(V_+) \cdot (V_-)^*$  e  $(I_+) \cdot (I_-)^*$  pode-se fazer a análise para uma grandeza trifásica G qualquer, cujas componentes são  $G_1$ ,  $G_2$  e  $G_3$ , de módulos  $g_1$ ,  $g_2$  e  $g_3$ .

De (8.1) e (8.2) tem-se:

$$\begin{aligned} 3 \cdot G_+ &= G_1 + G_2 / \theta + G_3 \cdot \theta \\ 3 \cdot G_- &= G_1 + G_2 \cdot \theta + G_3 / \theta \end{aligned}$$

Desta última tem-se:

$$3 \cdot (G_-)^* = G_1^* + G_2^* / \theta + G_3^* \cdot \theta$$

Assim:

$$\begin{aligned} 9 \cdot (G_+) \cdot (G_-)^* &= (G_1 + G_2 / \theta + G_3 \cdot \theta) \cdot (G_1^* + G_2^* / \theta + G_3^* \cdot \theta) \\ 9 \cdot (G_+) \cdot (G_-)^* &= G_1 \cdot G_1^* + G_2 \cdot G_3^* + G_3 \cdot G_2^* \\ &\quad + (G_2 \cdot G_2^* + G_3 \cdot G_1^* + G_1 \cdot G_3^*) \cdot \theta \\ &\quad + (G_3 \cdot G_3^* + G_1 \cdot G_2^* + G_2 \cdot G_1^*) / \theta \end{aligned} \quad (8.64)$$

Como  $G_1 + G_2 + G_3 = 0$ , tem-se:

$$\begin{aligned} G_1 &= -(G_2 + G_3) & G_2 &= -(G_1 + G_3) & G_3 &= -(G_1 + G_2) \\ G_1^* &= -(G_2^* + G_3^*) & G_2^* &= -(G_1^* + G_3^*) & G_3^* &= -(G_1^* + G_2^*) \end{aligned}$$

Desenvolvendo o produto  $G_1 \cdot G_1^*$ , tem-se:

$$\begin{aligned} G_1 \cdot G_1^* &= (G_2 + G_3) \cdot (G_2^* + G_3^*) \\ G_1 \cdot G_1^* &= G_2 \cdot G_2^* + G_2 \cdot G_3^* + G_3 \cdot G_2^* + G_3 \cdot G_3^* \\ G_2 \cdot G_3^* + G_3 \cdot G_2^* &= G_1 \cdot G_1^* - G_2 \cdot G_2^* - G_3 \cdot G_3^* \\ G_2 \cdot G_3^* + G_3 \cdot G_2^* &= 2 \cdot G_1 \cdot G_1^* - (G_1 \cdot G_1^* + G_2 \cdot G_2^* + G_3 \cdot G_3^*) \end{aligned}$$

Somando  $G_1 \cdot G_1^*$  nos dois lados da igualdade tem-se:

$$G_1 \cdot G_1^* + G_2 \cdot G_3^* + G_3 \cdot G_2^* = 3 \cdot G_1 \cdot G_1^* - (G_1 \cdot G_1^* + G_2 \cdot G_2^* + G_3 \cdot G_3^*)$$

Conforme (8.5) pode-se escrever:

$$G_1 \cdot G_1^* + G_2 \cdot G_3^* + G_3 \cdot G_2^* = 3 \cdot g_1^2 - (g_1^2 + g_2^2 + g_3^2) \quad (8.65)$$

Onde  $g_1$ ,  $g_2$  e  $g_3$  são os módulos das componentes  $G_1$ ,  $G_2$  e  $G_3$ , respectivamente.

A mesma análise pode ser feita para  $G_2 \cdot G_2^*$  e  $G_3 \cdot G_3^*$ , resultando em:

$$G_2 \cdot G_2^* + G_3 \cdot G_1^* + G_1 \cdot G_3^* = 3 \cdot g_2^2 - (g_1^2 + g_2^2 + g_3^2) \quad (8.66)$$

$$G_3 \cdot G_3^* + G_1 \cdot G_2^* + G_2 \cdot G_1^* = 3 \cdot g_3^2 - (g_1^2 + g_2^2 + g_3^2) \quad (8.67)$$

Substituindo (8.65), (8.66) e (8.67) em (8.64) tem-se:

$$\begin{aligned} 9 \cdot (G_+) \cdot (G_-)^* &= 3 \cdot g_1^2 - (g_1^2 + g_2^2 + g_3^2) \\ &+ \left[ 3 \cdot g_2^2 - (g_1^2 + g_2^2 + g_3^2) \right] \cdot \theta \\ &+ \left[ 3 \cdot g_3^2 - (g_1^2 + g_2^2 + g_3^2) \right] / \theta \end{aligned}$$

Desenvolvendo tem-se:

$$9 \cdot (G_+) \cdot (G_-)^* = 3 \cdot (g_1^2 + g_2^2 \cdot \theta + g_3^2 / \theta) - (g_1^2 + g_2^2 + g_3^2) \cdot (1 + \theta + 1/\theta)$$

De (8.4) tem-se que  $1 + \theta + 1/\theta = 0$ . Assim:

$$(G_+) \cdot (G_-)^* = \frac{1}{3} \cdot (g_1^2 + g_2^2 \cdot \theta + g_3^2 / \theta) \quad (8.68)$$

Aplicando (8.68) para  $(V_+) \cdot (V_-)^*$  e  $[(I_+) \cdot (I_-)^*]^*$  tem-se:

$$(V_+) \cdot (V_-)^* = \frac{1}{3} \cdot (v_1^2 + v_2^2 \cdot \theta + v_3^2 / \theta) \quad (8.69)$$

$$[(I_+) \cdot (I_-)^*]^* = \frac{1}{3} \cdot (i_1^2 + i_2^2 / \theta + i_3^2 \cdot \theta) \quad (8.70)$$

Note que para o produto das correntes já está considerado o conjugado complexo, tendo como consequência a inversão de  $\theta$  nos dois últimos termos.

Substituindo (8.69) e (8.70) em (8.63) tem-se:

$$\begin{aligned} (Se_+) \cdot (Se_-)^* &= -\frac{1}{3} \cdot \left[ (v_1^2 + v_2^2 \cdot \theta + v_3^2 / \theta) \cdot (i_1^2 + i_2^2 / \theta + i_3^2 \cdot \theta) \right] \\ (Se_+) \cdot (Se_-)^* &= -\frac{1}{3} \cdot (v_1^2 \cdot i_1^2 + v_2^2 \cdot i_2^2 + v_3^2 \cdot i_3^2) \\ &\quad - \frac{1}{3} \cdot (v_1^2 \cdot i_3^2 + v_2^2 \cdot i_1^2 + v_3^2 \cdot i_2^2) \cdot \theta \\ &\quad - \frac{1}{3} \cdot (v_1^2 \cdot i_2^2 + v_2^2 \cdot i_3^2 + v_3^2 \cdot i_1^2) / \theta \end{aligned} \quad (8.71)$$

De (8.3) tem-se que:

$$\Im(\theta) = \frac{\sqrt{3}}{2} \quad \Im(1/\theta) = -\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (8.72)$$

Substituindo (8.72) em (8.71) determina-se a parte imaginária de  $(Se_+) \cdot (Se_-)^*$  :

$$\begin{aligned}\Im\{(Se_+) \cdot (Se_-)^*\} &= -\frac{\sqrt{3}}{6} \cdot (v_1^2 \cdot i_3^2 + v_2^2 \cdot i_1^2 + v_3^2 \cdot i_2^2) + \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot (v_1^2 \cdot i_2^2 + v_2^2 \cdot i_3^2 + v_3^2 \cdot i_1^2) \\ 2 \cdot \Im\{(Se_+) \cdot (Se_-)^*\} &= \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot [(v_1^2 \cdot i_2^2 + v_2^2 \cdot i_3^2 + v_3^2 \cdot i_1^2) - (v_1^2 \cdot i_3^2 + v_2^2 \cdot i_1^2 + v_3^2 \cdot i_2^2)] \\ 2 \cdot \Im\{(Se_+) \cdot (Se_-)^*\} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot [v_1^2 \cdot (i_2^2 - i_3^2) + v_2^2 \cdot (i_3^2 - i_1^2) + v_3^2 \cdot (i_1^2 - i_2^2)]\end{aligned}\quad (8.73)$$

Substituindo (8.73) em (8.50) tem-se:

$$q_x = \frac{[v_1^2 \cdot (i_2^2 - i_3^2) + v_2^2 \cdot (i_3^2 - i_1^2) + v_3^2 \cdot (i_1^2 - i_2^2)]}{\sqrt{3} \cdot q_d} \quad (8.74)$$

Raciocínio semelhante é feito para determinar a parte real de  $(Se_+) \cdot (Se_-)^*$  :

De (8.3) tem-se:

$$\Re(\theta) = -\frac{1}{2} \quad \Re(1/\theta) = -\frac{1}{2} \quad (8.75)$$

Substituindo (8.75) em (8.71) e multiplicando todos os termos por 2, tem-se:

$$\begin{aligned}2 \cdot \Re\{(Se_+) \cdot (Se_-)^*\} &= -\frac{2}{3} \cdot (v_1^2 \cdot i_1^2 + v_2^2 \cdot i_2^2 + v_3^2 \cdot i_3^2) \\ &\quad + \frac{1}{3} \cdot (v_1^2 \cdot i_3^2 + v_2^2 \cdot i_1^2 + v_3^2 \cdot i_2^2) \\ &\quad + \frac{1}{3} \cdot (v_1^2 \cdot i_2^2 + v_2^2 \cdot i_3^2 + v_3^2 \cdot i_1^2)\end{aligned}$$

Seja feita a seguinte transformação:

$$\begin{aligned}2 \cdot \Re\{(Se_+) \cdot (Se_-)^*\} &= -(v_1^2 \cdot i_1^2 + v_2^2 \cdot i_2^2 + v_3^2 \cdot i_3^2) \\ &\quad + \frac{1}{3} \cdot (v_1^2 \cdot i_1^2 + v_2^2 \cdot i_2^2 + v_3^2 \cdot i_3^2) \\ &\quad + \frac{1}{3} \cdot (v_1^2 \cdot i_3^2 + v_2^2 \cdot i_1^2 + v_3^2 \cdot i_2^2) \\ &\quad + \frac{1}{3} \cdot (v_1^2 \cdot i_2^2 + v_2^2 \cdot i_3^2 + v_3^2 \cdot i_1^2)\end{aligned}$$

Seja S a soma das três últimas parcelas da expressão acima:

$$S = \frac{1}{3} (v_1^2 + v_2^2 + v_3^2) \cdot (i_1^2 + i_2^2 + i_3^2) = 3 \cdot v^2 \cdot i^2$$

$$v \rightarrow \text{valor eficaz da tensão [V]} \quad v^2 = \frac{1}{3} (v_1^2 + v_2^2 + v_3^2)$$

$$i \rightarrow \text{valor eficaz da corrente [A]} \quad i^2 = \frac{1}{3} (i_1^2 + i_2^2 + i_3^2)$$

Assim:

$$2 \cdot \Re\{(Se_+) \cdot (Se_-)^*\} = 3 \cdot v^2 \cdot i^2 - (v_1^2 \cdot i_1^2 + v_2^2 \cdot i_2^2 + v_3^2 \cdot i_3^2) \quad (8.76)$$

Substituindo (8.76) em (8.62) tem-se:

$$\begin{aligned} qd &= 1,5 \cdot (v^2 \cdot i^2 + v_\delta^2 \cdot i_\delta^2) + 3 \cdot v^2 \cdot i^2 - (v_1^2 \cdot i_1^2 + v_2^2 \cdot i_2^2 + v_3^2 \cdot i_3^2) \\ qd &= 4,5 \cdot v^2 \cdot i^2 + 1,5 \cdot v_\delta^2 \cdot i_\delta^2 - (v_1^2 \cdot i_1^2 + v_2^2 \cdot i_2^2 + v_3^2 \cdot i_3^2) \end{aligned} \quad (8.77)$$

Pode-se agora retornar ao objetivo final de 8.4.9: determinar  $Pe_+ + Pe_-$ .

De (8.46) tem-se:

$$Se_+ - Se_- = (qr + j \cdot qx) \cdot (Se_+ + Se_-)$$

Substituindo (8.45) na expressão acima, tem-se:

$$\begin{aligned} Pe_+ + j \cdot Qe_+ - Pe_- - j \cdot Qe_- &= (qr + j \cdot qx) \cdot (Pe_+ + j \cdot Qe_+ + Pe_- + j \cdot Qe_-) \\ (Pe_+ - Pe_-) + j \cdot (Qe_+ - Qe_-) &= (qr + j \cdot qx) \cdot [(Pe_+ + Pe_-) + j \cdot (Qe_+ + Qe_-)] \\ (Pe_+ - Pe_-) &= qr \cdot (Pe_+ + Pe_-) - qx \cdot (Qe_+ + Qe_-) \\ j \cdot (Qe_+ - Qe_-) &= j \cdot [qx \cdot (Pe_+ + Pe_-) + qr \cdot (Qe_+ + Qe_-)] \end{aligned}$$

Da parte real da expressão acima se tira que:

$$(Pe_+ - Pe_-) = qr \cdot Pe - qx \cdot Qe \quad (8.78)$$

Conforme mencionado no início de 8.4.10, a potência ativa de entrada,  $Pe$ , é obtida diretamente da leitura dos wattímetros. A potência reativa,  $Qe$ , é calculada por:

$$Qe = \sqrt{|Se|^2 - Pe^2}$$

$|Se|^2$  representa o quadrado da potência aparente, e conforme (8.52) é igual a **qd**.

Assim:

$$Qe = \sqrt{qd - Pe^2} \quad (8.79)$$

Substituindo (8.78) em (8.36) tem-se:

$$T_F - T_T = qr \cdot Pe - qx \cdot Qe - 1,5 \cdot i_\delta^2 \cdot R_1 - v_\delta^2 / R_{fe} \quad (8.80)$$

E, finalmente, substituindo (8.80) em (8.25) tem-se:

$$P_s = (qr \cdot Pe - qx \cdot Qe - 1,5 \cdot i_\delta^2 \cdot R_1 - v_\delta^2 / R_{fe}) \cdot (1 - s) - P_{mec} \quad (8.81)$$

Conforme 8.4.7, a metodologia desenvolvida independe da ligação do motor ser em estrela ou triângulo. Assim, deve-se definir a corrente de teste ( $I_{tN}$ ) pelo valor de linha:

$$I_{tN} = \sqrt{I_N^2 - I_0^2} \quad (8.82)$$

$I_N \rightarrow$  Corrente de linha de carga nominal [A].

$I_0 \rightarrow$  Corrente de linha em vazio [A].

A Tabela 8.1 apresenta um resumo das variáveis necessárias para determinação das perdas suplementares nesta nova rotina, conforme equação (8.81).

**Tabela 8.1 – Resumo das variáveis para determinação das perdas suplementares**

Variável	Origem	Equação	Equações complementares
qr	calculado	(8.61)	(8.39) (8.40) (8.41) (8.42) (8.43) (8.44) (8.77)
Pe	medido		
qx	calculado	(8.74)	(8.77)
Qe	calculado	(8.79)	(8.77)
$i_\delta^2$	calculado	(8.42)	(8.43)
$R_l$	medido		
$v_\delta^2$	calculado	(8.42)	(8.44)
$R_{fe}$	calculado	(6.19)	
s	medido		
$P_{mec}$	medido		

## 8.5 Correção das perdas mecânicas

O item 6.13 deste trabalho mostra que as perdas mecânicas são corrigidas em todos os seis pontos do ensaio, proporcionalmente à relação quadrática da rotação do ponto pela rotação síncrona, conforme (6.41). Em [8] não é apresentada esta correção, porém a mesma foi acrescentada neste trabalho para efeito de comparação dos resultados da rotina de cálculo proposta contra os resultados da rotina do método eh-star.

## 8.6 Perdas suplementares devido à seqüência negativa

O item 6.15 deste trabalho mostra que o método eh-star propõe uma redução nas perdas suplementares em todos os seis pontos do ensaio utilizando um fator k, definido em (6.45) e (6.46). Esta redução se baseia no fato da carga estar sendo simulada pela seqüência negativa, e por isso sugere considerar apenas esta parcela de perdas, desprezando a parcela

devida à sequência positiva. A parcela de perdas suplementares devida à sequência negativa está definida em (6.47).

Da mesma forma em relação ao item anterior, em [8] não é apresentada esta consideração, porém a mesma também foi acrescentada para efeito de comparação dos resultados da rotina de cálculo proposta contra os resultados da rotina do método eh-star.

### 8.7 Correção no valor das perdas suplementares

O item 6.16 deste trabalho mostra que o método eh-star propõe que, após definidas as perdas suplementares devida à corrente de sequência negativa para os seis pontos, deve-se traçar um gráfico  $(I_- / I_{tN})^2 \times P_{sup(-)}$ , onde  $I_-$  é a corrente de sequência negativa do ponto e  $I_{tN}$  é a corrente de teste nominal, fixa para todos os pontos, definida em (8.82).

Com uma regressão linear obtém-se a equação  $P_{sup(-)} = a \cdot (I_- / I_{tN})^2 + b$ .

Como as perdas suplementares por definição são nulas em vazio, despreza-se o parâmetro “b” e a equação fica  $P_{supc} = a \cdot (I_- / I_{tN})^2$ , onde  $P_{supc}$  representa o valor das perdas suplementares corrigidas para cada ponto.

Assim, para  $(I_- / I_{tN})^2 = 1$ , ou seja,  $I_- = I_{tN}$ , o parâmetro “a” determina o valor das perdas suplementares de carga nominal do motor.

Em [8] não é apresentada esta correção, porém da mesma forma como nos itens anteriores, este procedimento foi adotado para efeito de comparação dos resultados da rotina de cálculo proposta contra os resultados da rotina do método eh-star.

### 8.8 Comparação entre os métodos de cálculo proposto e o eh-star

Para a verificação do procedimento de cálculo da rotina proposta, foram utilizados como dados de entrada os parâmetros do ensaio eh-star do motor 11 kW, 4 pólos, 50 Hz, 400 V (Y), carcaça IEC 160M [2], apresentado no Anexo 8.

A Tabela 8.2 mostra os valores de corrente nominal ( $I_N$ ) e vazio ( $I_0$ ), as resistências de linha a frio ( $R_{20}$ ), inicial ( $R_{ini}$ ) e final ( $R_{fim}$ ), as perdas no ferro ( $P_{fe}$ ) e mecânicas ( $P_{mec}$ ), assim como também as tensões ( $U_{uv}$ ,  $U_{vw}$  e  $U_{wu}$ ), as correntes ( $I_u$ ,  $I_v$  e  $I_w$ ), a potência de entrada ( $P_e$ ) e a rotação ( $n$ ), medidas nos seis pontos do ensaio eh-star (input data).

A Tabela 8.3 mostra os valores das correntes de sequência positiva ( $I_+$ ) e negativa ( $I_-$ ) (identificadas no Anexo 8 como  $I_1$  e  $I_2$ , respectivamente), a relação  $(I_- / I_{tN})^2$ , o fator k, o valor das perdas suplementares totais ( $P_{sup}$ ) e a parcela relativa à sequência negativa,

$P_{\text{sup}(-)}$ , obtidos pela rotina eh-star. As perdas suplementares corrigidas,  $P_{\text{supc}}$ , são obtidas por regressão linear de  $(I_- / I_{tN})^2 \times P_{\text{sup}(-)}$ , conforme item 6.16.

A Tabela 8.4 mostra os resultados obtidos com a rotina proposta.

A Tabela 8.5 mostra a variação percentual entre os resultados calculados com a rotina proposta (Tabela 8.4) e a rotina eh-star (Tabela 8.3).

**Tabela 8.2 – Ensaio eh-star motor 11 kW 4p 50 Hz 400V (Y) [2]**

$I_N = 22,5 \text{ A}$	$R_{20} = 0,6711261 \, \Omega$				
$I_0 = 7,774 \text{ A}$	$P_{fe} = 245,31 \text{ W}$				
$I_{tN} = 21,1 \text{ A}$	$R_{ini} = 0,7047120 \, \Omega$				
	$P_{mec} = 62,831 \text{ W}$				
	$R_{fim} = 0,7640442 \, \Omega$				

Pontos $\rightarrow$	1	2	3	4	5	6
% $I_N$	150%	138%	125%	113%	100%	75%
$I_{ref} \text{ [A]}$	<b>33,75</b>	<b>31,05</b>	<b>28,13</b>	<b>25,42</b>	<b>22,50</b>	<b>16,88</b>

Uuv [V]	241,17	228,01	213,99	198,83	182,42	145,38
Uvw [V]	218,01	206,41	193,86	180,28	165,31	132,22
Uwu [V]	56,97	52,40	47,87	43,09	38,41	28,00
Iu [A]	23,059	21,151	19,258	17,273	15,249	11,061
<b>*Iv [A]</b>	<b>33,623</b>	<b>30,896</b>	<b>28,165</b>	<b>25,378</b>	<b>22,495</b>	<b>16,716</b>
Iw [A]	28,620	26,405	24,155	21,840	19,400	14,473
Pe [W]	3027,1	2635,3	2240,9	1865,3	1498,2	873,4
n [rpm]	1468,7	1467,7	1467,1	1466,9	1466,8	1467,5

\* Durante o ensaio eh-star a corrente Iv é ajustada pela corrente de referência  $I_{ref}$ .

#### Notas:

- 1) Conforme nota em 8.4.2, a rotina de cálculo proposta em [8] foi desenvolvida com um sentido de giro positivo contrário ao do eh-star, por isso foi necessária a troca de dois pontos de tensão e corrente em relação à tabela original do artigo de referência [2]: Uuv por Uvw e Iu por Iw.
- 2) A nota nº 1 pode ser observada comparando a Tabela 8.2 com o Anexo 8.
- 3) Os resultados da Tabela 8.4 podem ser verificados no Anexo 9.



**Tabela 8.3 – Resultados determinados pela rotina de cálculo do método eh-star [2]**

Pontos →	1	2	3	4	5	6
$I_+$ [A]	6,0408	5,5591	5,0713	4,6060	4,1124	3,2026
$I_-$ [A]	28,0804	25,8258	23,5638	21,2277	18,8062	13,8874
$(I_- / I_{tN})^2$	1,7687	1,4961	1,2455	1,0108	0,7933	0,4326
k [pu]	0,9558	0,9557	0,9557	0,9550	0,9544	0,9495
$P_{sup}$ [W]	565,78	485,51	417,39	358,20	287,64	170,29
$P_{sup(-)}$ [W]	540,77	464,00	398,90	342,08	274,52	161,69
$P_{supc}$ [W]	495,29	418,95	348,77	283,05	222,15	121,14

Notas:

- 1) O Anexo 8 não apresenta valores de  $P_{sup}$ , mas apenas  $P_{sup(-)}$ , chamados de  $P_{ad}$ .
- 2) Os valores de  $P_{sup}$  da Tabela 8.3 foram determinados dividindo-se  $P_{sup(-)}$  por k.
- 3) No Anexo 8 os valores de  $P_{supc}$  são chamados de  $P_{ad,c}$ .

**Tabela 8.4 – Resultados determinados pela rotina de cálculo proposta [8]**

Pontos →	1	2	3	4	5	6
$I_+$ [A]	6,1546	5,6669	5,1723	4,6996	4,1980	3,2700
$I_-$ [A]	28,0932	25,8380	23,5750	21,2377	18,8153	13,8943
$(I_- / I_{tN})^2$	1,7703	1,4975	1,2467	1,0117	0,7941	0,4330
k [pu]	0,9542	0,9541	0,9541	0,9533	0,9526	0,9475
$P_{sup}$ [W]	568,99	488,36	419,86	360,25	289,12	171,04
$P_{sup(-)}$ [W]	542,93	465,94	400,58	343,43	275,41	162,06
$P_{supc}$ [W]	497,72	421,02	350,50	284,45	223,26	121,75

**Tabela 8.5 – Variação percentual entre as rotinas de cálculo proposta e eh-star**

Pontos →	1	2	3	4	5	6
$P_{sup}$ [W]	0,57%	0,59%	0,59%	0,57%	0,51%	0,44%
$P_{sup(-)}$ [W]	0,40%	0,42%	0,42%	0,39%	0,32%	0,23%
$P_{supc}$ [W]	0,49%	0,49%	0,49%	0,49%	0,50%	0,50%

Onde:

$I_u, I_v$  e  $I_w \rightarrow$  correntes de linha [A]

$U_{uv}, U_{vw}$  e  $U_{wu} \rightarrow$  tensões de linha [V]

$P_e \rightarrow$  potência de entrada [W]

$n \rightarrow$  rotação do rotor [rpm]

$I_+$  e  $I_- \rightarrow$  correntes de sequência positiva e negativa [A]

$k \rightarrow$  representa a parcela de  $P_{\text{sup}}$  devida à sequência negativa, calculado em (6.45)

$P_{\text{sup}} \rightarrow$  perdas suplementares totais [W]

$P_{\text{sup}(-)} \rightarrow$  perdas suplementares devido à sequência negativa [W] [ $P_{\text{sup}(-)} = k \cdot P_{\text{sup}}$ ]

$P_{\text{supc}} \rightarrow$  perdas suplementares corrigidas (conforme item 6.16) [W]

A Figura 8.8 e a Figura 8.9 apresentam os gráficos de  $(I_- / I_{\text{tN}})^2 \times P_{\text{sup}(-)}$  a partir da Tabela 8.3 e Tabela 8.4, respectivamente.

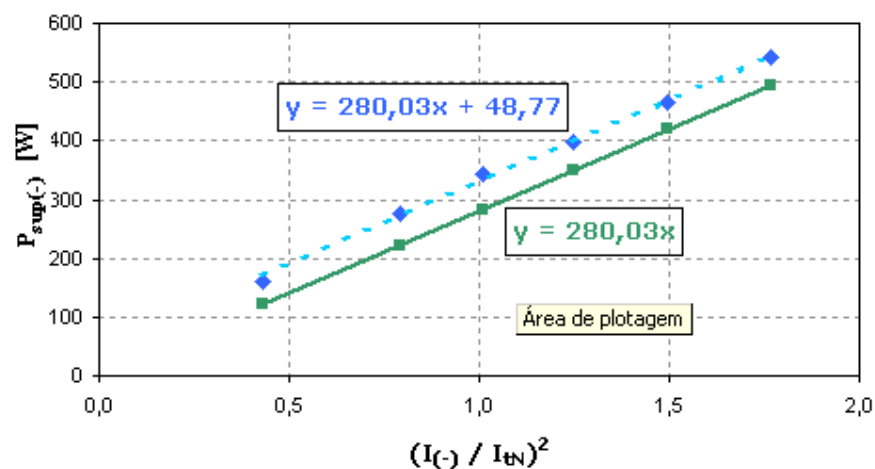


Figura 8.8 – Gráfico  $(I_{(-)} / I_{\text{tN}})^2 \times P_{\text{sup}(-)}$  a partir da Tabela 8.3

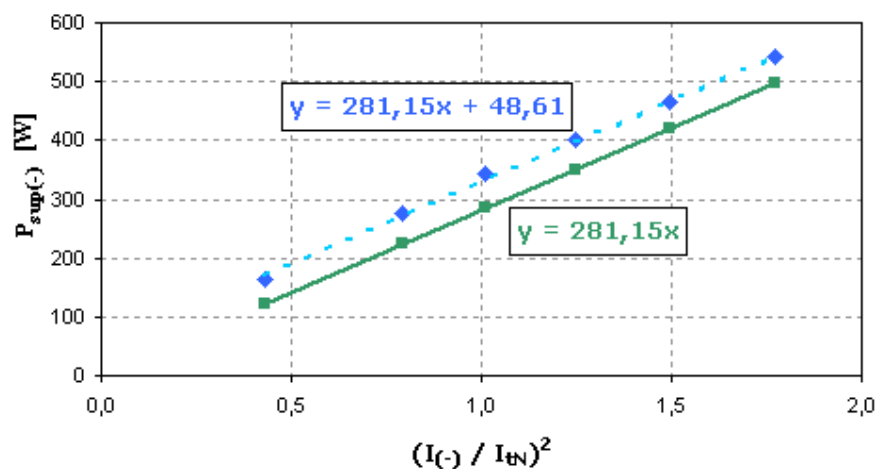


Figura 8.9 – Gráfico  $(I_{(-)} / I_{\text{tN}})^2 \times P_{\text{sup}(-)}$  a partir da Tabela 8.4

Nota: A linha pontilhada representa valores de  $P_{\text{sup}(-)}$  e a sólida, valores de  $P_{\text{supc}}$ .

Considerando carga nominal, ou seja,  $I_- = I_{tN}$ , tem-se:

Rotina eh-star:  $P_{sNom} = 280,03 \text{ W}$

Rotina proposta:  $P_{sNom} = 281,15 \text{ W (0,40\%)}$

O Anexo 9 apresenta em detalhes a seqüência de cálculos da rotina proposta, executada no software Mathcad, considerando os parâmetros do Anexo 8.

Nota: No Anexo 9 pode-se verificar os dados da Tabela 8.4

## 8.9 Comentários adicionais

Em [8] apresentam-se os seguintes comentários e sugestões:

- 1) Este tipo de ensaio, com alimentação desequilibrada, determina apenas as perdas suplementares de alta frequência, sendo ainda necessário o ensaio de rotor removido para determinação das perdas suplementares de frequência nominal.
- 2) Pode-se traçar o gráfico de  $(I_{ef} / I_{tN})^2 \times P_{sup}$  ao invés de  $(I_- / I_{tN})^2 \times P_{sup(-)}$

Onde

$$I_{ef} = \sqrt{(I_+)^2 + (I_-)^2} = \sqrt{\frac{I_u^2 + I_v^2 + I_w^2}{3}} \quad (8.83)$$

Assim, elimina-se a necessidade do fator k, conforme demonstrado no Anexo 10.

## 8.10 Determinação das perdas suplementares utilizando $I_{ef}$

Para comprovar o comentário 2 do item 8.9, foram copiados os valores de  $I_+$ ,  $I_-$  e  $P_{sup}$  da Tabela 8.3 e da Tabela 8.4 para a Tabela 8.6 e a Tabela 8.7, respectivamente.

Os valores de  $I_{ef}$  foram obtidos da equação (8.83) e os valores de  $P_{supc}$  foram obtidos por regressão linear de  $(I_{ef} / I_{tN})^2 \times P_{sup}$ , semelhantemente ao item 6.16.

**Tabela 8.6 – Resultados determinados pela rotina eh-star considerando  $(I_{ef}/I_{tN})^2 \times P_{sup}$**

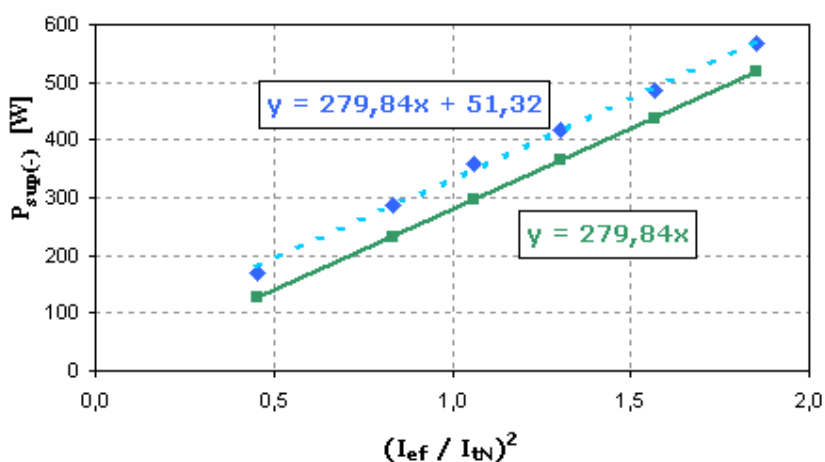
Pontos →	1	2	3	4	5	6
$I_+ \text{ [A]}$	6,0408	5,5591	5,0713	4,6060	4,1124	3,2026
$I_- \text{ [A]}$	28,0804	25,8258	23,5638	21,2277	18,8062	13,8874
$I_{ef} \text{ [A]}$	28,7228	26,4173	24,1033	21,7217	19,2506	14,2519
$(I_{ef} / I_{tN})^2$	1,8531	1,5675	1,3049	1,0598	0,8324	0,4562
$P_{sup} \text{ [W]}$	565,78	485,51	417,39	358,20	287,64	170,29
$P_{supc} \text{ [W]}$	521,15	440,85	367,00	298,06	234,10	128,31

**Tabela 8.7 – Resultados determinados pela rotina proposta considerando  $(I_{ef}/I_{tN})^2 \times P_{sup}$**

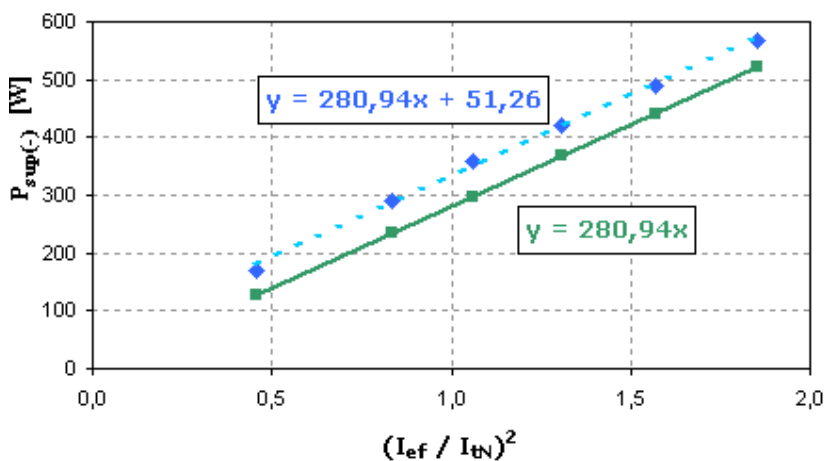
Pontos →	1	2	3	4	5	6
$I_+$ [A]	6,1546	5,6669	5,1723	4,6996	4,1980	3,2700
$I_-$ [A]	28,0932	25,8380	23,5750	21,2377	18,8153	13,8943
$I_{ef}$ [A]	28,7595	26,4522	24,1357	21,7515	19,2779	14,2740
$(I_{ef} / I_{tN})^2$	1,8553	1,5695	1,3067	1,0613	0,8336	0,4570
$P_{sup}$ [W]	568,99	488,36	419,86	360,25	289,12	171,04
$P_{supc}$ [W]	521,23	440,95	367,10	298,16	234,20	128,40

Nota: No Anexo 9 pode-se verificar também os dados da Tabela 8.7.

A Figura 8.10 e a Figura 8.11 apresentam os gráficos de  $(I_{ef} / I_{tN})^2 \times P_{sup}$  a partir da Tabela 8.6 e Tabela 8.7, respectivamente.



**Figura 8.10 – Gráfico  $(I_{ef}/I_{tN})^2 \times P_{sup}$  a partir da Tabela 8.6**



**Figura 8.11 – Gráfico  $(I_{ef}/I_{tN})^2 \times P_{sup}$  a partir da Tabela 8.7**

Considerando carga nominal, ou seja,  $I_{ef} = I_{tN}$ , tem-se:

Rotina eh-star:  $P_{sNom} = 279,84 \text{ W}$

Rotina proposta:  $P_{sNom} = 280,94 \text{ W}$

É importante salientar que o objetivo do ensaio é obter as perdas suplementares de carga nominal, com isso não se deve comparar os valores de  $P_{supc}$  da Tabela 8.3 com os da Tabela 8.6, assim como os da Tabela 8.4 com os da Tabela 8.7, mas sim apenas o valor de carga nominal, representado pelo coeficiente angular da reta.

### 8.11 Conclusão

As variações dos resultados de cálculo apresentados na Tabela 8.5 para os seis pontos de ensaio, considerando a rotina proposta comparada à rotina eh-star, são significativamente pequenas, comprovando a validade desta nova rotina.

Quanto às perdas suplementares no ponto de carga nominal, pode-se observar na Tabela 8.8, que a rotina proposta apresentou uma variação de apenas 0,4% em relação à rotina eh-star, considerando tanto  $(I_- / I_{tN})^2 \times P_{sup(-)}$  quanto  $(I_{ef} / I_{tN})^2 \times P_{sup}$ .

**Tabela 8.8 – Perdas suplementares em carga nominal**

	$(I_- / I_{tN})^2 \times P_{sup(-)}$	$(I_{ef} / I_{tN})^2 \times P_{sup}$	
Rotina eh-star	280,03	279,84	-0,068%
Rotina proposta	281,15	280,94	-0,075%
	0,40%	0,39%	

Quanto à proposta de eliminar o fator k, determinando as perdas suplementares de carga nominal através do gráfico  $(I_{ef} / I_{tN})^2 \times P_{sup}$ , conforme mostrado em 8.10, mostrou-se válida ao verificarmos na Tabela 8.8 a pequena variação no valor das perdas suplementares em relação aos resultados originais, tanto para a rotina eh-star quanto para a rotina proposta: -0,068% e -0,075%, respectivamente.

O Anexo 9 apresenta a sequência de cálculos da rotina proposta executada no software Mathcad, tanto para  $(I_- / I_{tN})^2 \times P_{sup(-)}$  quanto para  $(I_{ef} / I_{tN})^2 \times P_{sup}$ , considerando os parâmetros do ensaio eh-star do relatório de ensaio eh-star mostrado no Anexo 8.

Nota: É importante salientar que a eliminação do fator k não está relacionada com a rotina de cálculo proposta, podendo também ser realizada a partir dos dados do próprio eh-star, conforme visto na Tabela 8.8.

## 9 ENSAIO DO MOTOR 15 CV 4 PÓLOS PELO MÉTODO ALTERNATIVO

### 9.1 Introdução

Com o objetivo de comprovar na prática o método de ensaio apresentado no capítulo 8, foi realizado o teste com o mesmo motor 15 cv, 4pólos, 50 Hz, 400/690 V, carcaça IEC 160M, referido no item 4.3 deste trabalho. O ensaio foi realizado no laboratório elétrico I da WEG, com a ligação do motor ao gerador conforme Figura 8.1.

### 9.2 Resultado do ensaio

Na Tabela 9.1 podem-se observar os valores das tensões  $U_{uv}$ ,  $U_{vw}$  e  $U_{wu}$ , das correntes  $I_u$ ,  $I_v$  e  $I_w$ , da potência de entrada  $P_e$  e a rotação  $n$  medidas nos seis pontos.

**Tabela 9.1 – Ensaio do motor 15 cv 4p utilizando o método alternativo**

Pontos →	1	2	3	4	5	6
% $I_N$	150%	138%	125%	113%	100%	75%
<b><math>I_{ref}</math> [A]</b>	<b>20,06</b>	<b>18,45</b>	<b>16,71</b>	<b>15,11</b>	<b>13,37</b>	<b>10,03</b>
$U_{uv}$ [V]	507,4	480,3	444,9	409,8	370,2	284,8
$U_{vw}$ [V]	298,6	282,1	261,0	239,8	215,9	165,1
$U_{wu}$ [V]	302,6	286,2	265,2	244,3	220,9	168,9
$I_u$ [A]	18,27	16,83	15,13	13,62	12,01	8,77
<b>*<math>I_v</math> [A]</b>	<b>20,02</b>	<b>18,49</b>	<b>16,68</b>	<b>15,08</b>	<b>13,35</b>	<b>10,00</b>
$I_w$ [A]	12,88	11,86	10,67	9,60	8,44	6,10
$P_e$ [W]	3981	3486	2905	2406	1911	1098
$n$ [rpm]	1470	1470	1470	1470	1471	1469

\* Durante o ensaio a corrente  $I_v$  é ajustada pela corrente de referência  $I_{ref}$ .

Nota: O ensaio foi realizado com o motor ligado em estrela ( $U_N = 690$  V).

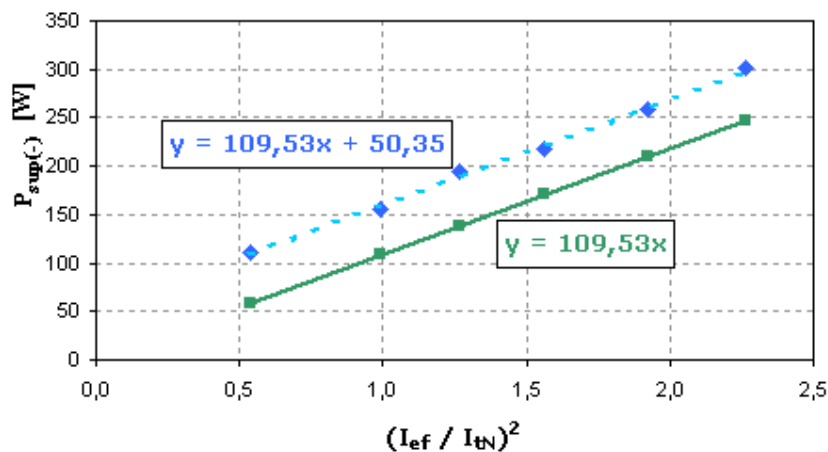
Na Tabela 9.2 as correntes de sequência positiva ( $I_+$ ) e negativa ( $I_-$ ), e também as perdas suplementares totais ( $P_{sup}$ ), foram determinadas pela rotina proposta. A corrente eficaz ( $I_{ef}$ ) foi obtida da equação (8.83). As perdas suplementares corrigidas ( $P_{supc}$ ), foram obtidas por regressão linear de  $(I_{ef} / I_{IN})^2 \times P_{sup}$ , conforme Figura 9.1.

Como o ensaio foi realizado com ligação estrela, a corrente de teste ( $I_{IN}$ ) é a mesma da Tabela 4.2, ou seja,  $I_{IN} = 11,52$  A.

Tabela 9.2 – Resultado do ensaio do motor 15cv 4p utilizando o método alternativo

Pontos →	1	2	3	4	5	6
$I_+$ [A]	4,154	3,853	3,489	3,177	2,844	2,252
$I_-$ [A]	16,820	15,505	13,958	12,580	11,097	8,143
$I_+ / I_-$	0,247	0,249	0,250	0,253	0,256	0,277
$I_{ef}$ [A]	17,325	15,977	14,387	12,975	11,456	8,448
$(I_{ef} / I_{tN})^2$	2,263	1,924	1,560	1,269	0,989	0,538
$P_{sup}$ [W]	301,3	258,0	218,4	193,6	156,0	110,6
$P_{supc}$ [W]	247,9	210,7	170,9	139,0	108,3	58,9

A Figura 9.1 apresenta o gráfico de  $(I_{ef} / I_{tN})^2 \times P_{sup}$  a partir da Tabela 9.2

Figura 9.1 – Gráfico  $(I_{ef}/I_{tN})^2 \times P_{sup}$  a partir da Tabela 9.2

Notas:

- 1) A linha pontilhada representa valores de  $P_{sup}$  e a linha sólida valores de  $P_{supc}$ .
- 2) As perdas suplementares corrigidas ( $P_{supc}$ ) da Tabela 9.2 foram obtidas pelo produto de  $(I_{ef} / I_{tN})^2$  por 109,53, que é o coeficiente angular da reta.
- 3) O cálculo das perdas suplementares considerando  $(I_- / I_{tN})^2 \times P_{sup(-)}$  não foi feito, pois conforme verificado na Tabela 8.8, a diferença é insignificante.
- 4) O coeficiente de correlação entre os pontos é 0,998.

Considerando carga nominal, ou seja,  $I_{ef} = I_{tN}$ , tem-se:  $P_{sNom} = 109,53 \text{ W}$

### 9.3 Verificação do ensaio

O ensaio atendeu aos seguintes critérios:

- 1) Relação  $I_+ / I_-$  abaixo de 0,30 em todos os pontos.
- 2) Escorregamento em todos os pontos menor que o dobro do nominal.
- 3) Coeficiente de correlação dos pontos na Figura 9.1 acima de 0,95.

### 9.4 Comparação do resultado com o ensaio eh-star

Comparando as perdas suplementares de carga nominal obtidas no ensaio eh-star (item 4.4) e no ensaio alternativo (item 9.2), tem-se:

Ensaio pelo método eh-star..... (Figura 3.1):  $P_{sNom} = 117,37 \text{ W}$

Ensaio pelo método alternativo (Figura 8.1):  $P_{sNom} = 109,53 \text{ W} (-6,7\%)$

### 9.5 Conclusão

A diferença percentual verificada no item 9.4 está dentro do aceitável quando se compara resultados de perdas suplementares de um mesmo motor.

Isto porque é praticamente impossível realizar dois ensaios consecutivos e obter resultados muito próximos, independente do método de ensaio utilizado.

Duas importantes vantagens deste método em relação ao eh-star podem ser citadas:

- 1) Não há necessidade do resistor de potência  $R_{eh}$ .
- 2) É possível testar motores ligados em triângulo (delta).

#### Notas:

- 1) A possibilidade de ensaiar o motor ligado em triângulo foi verificada na prática, apresentando resultado semelhante à ligação estrela.
- 2) No ensaio com o método alternativo, a relação  $I_+ / I_-$  deu abaixo de 0,30 em todos os pontos já no primeiro ensaio, ao contrário do ensaio eh-star que precisou ser repetido com incrementos no valor de  $R_{eh}$ , conforme Tabela 4.3.



## 10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme comentado no capítulo 1, há uma crescente preocupação mundial com a conservação de energia elétrica, visto que seu consumo tem crescido num ritmo mais acelerado do que a sua produção. Além disso, como as máquinas elétricas são grandes consumidores de energia, tem havido uma preocupação maior com projetos de máquinas com mais eficiência.

Neste mesmo capítulo, foi visto que a eficiência de uma máquina está relacionada às suas perdas totais e que para aumentá-la tem-se que reduzir estas perdas. Basicamente, são cinco os tipos de perdas numa máquina elétrica: perdas mecânicas, perdas no ferro, perdas Joule no estator, perdas Joule no rotor e perdas suplementares.

Para reduzir perdas mecânicas pode-se, por exemplo, utilizar um ventilador menor. Para reduzir perdas no ferro pode-se, por exemplo, usar uma chapa de melhor qualidade. Para reduzir perdas Joule no estator pode-se, por exemplo, utilizar fio de bitola maior. Para reduzir perdas Joule no rotor pode-se, por exemplo, aumentar a gaiola de alumínio. Por fim, para reduzir perdas suplementares pode-se adotar alguma das sugestões do item 2.2.

As quatro primeiras perdas têm um procedimento padrão de medida, podendo assim ser comparadas o antes e o depois da melhoria aplicada no projeto da máquina.

Quanto às perdas suplementares, como se pode saber o quanto foram reduzidas se não tivermos um procedimento adequado e confiável para medi-las? No item 2.4 deste trabalho são apresentados alguns métodos de ensaio, sendo alguns deles normalizados.

No início deste século foi aberta uma discussão entre os principais fabricantes mundiais com objetivo de uniformizar um método de medida das perdas suplementares, sendo proposto inicialmente o método B da norma IEEE 112 (semelhante às normas CSA C390, NBR 5383), que é o método aceito pela NEMA. Com este intuito, foi criado em 2002 o projeto de norma chamado IEC 61972 [11].

Porém, percebendo uma queda acentuada na eficiência de suas máquinas, os fabricantes europeus propuseram colocar em pauta o método eh-star. Isto porque o método das normas NEMA/CSA resulta em valores de perdas suplementares maiores que 0,5% da potência absorvida, considerado até então pela norma IEC 34-2.

Em 2004, a norma IEC 60034-2-1 passou a contemplar além dos dois métodos indicados na IEC 61972, os métodos de rotação reversa e o eh-star, porém de forma provisória. Sua primeira edição foi lançada oficialmente em setembro de 2007 [12].

A norma IEC 60034-2-1 classifica os métodos para determinação das perdas suplementares quanto ao grau de incerteza no resultado destas perdas (Tabela 10.1).

**Tabela 10.1 – Classificação quanto ao grau de incerteza segundo a IEC 60034 -2-1**

Método	Incerteza
Perdas residuais (semelhante à NEMA)	Baixa
Valor assumido (semelhante à IEC 34-2)	Média/Alta
Eh-star	Média
Rotação reversa e rotor removido	Alta

Toda esta discussão despertou o interesse dos principais fabricantes mundiais em conhecer o novo método, aplicando o mesmo a alguns de seus motores.

O presente trabalho de dissertação de mestrado teve como objetivo trazer à WEG um conhecimento mais aprofundado do método eh-star, com a preocupação não só de realizar os ensaios na empresa, mas também de entender sua base teórica.

No capítulo 3 apresentou-se uma visão geral do método eh-star, mostrando os requisitos necessários para a realização do ensaio e os procedimentos a serem seguidos.

No capítulo 4 apresentou-se a relação dos 31 ensaios realizados na WEG, assim como também a comparação dos resultados de perdas suplementares entre os métodos eh-star, IEEE 112-B (NEMA) e IEC 34-2. Este capítulo destacou ainda detalhes do ensaio de um motor WEG de 15 cv 4p, mostrando o relatório eh-star original em planilha Excel (Figura 4.3), criada pela Darmstadt University, Germany [2].

No capítulo 5 apresentou-se a teoria básica de componentes simétricas, necessária para o entendimento da metodologia envolvida na rotina de cálculo do método eh-star.

No capítulo 6 apresentou-se a base da teoria do método eh-star, sendo inclusive demonstrado todo o procedimento matemático utilizado para chegar às equações mostradas no anexo B da IEC 60034-2-1. Este desenvolvimento não foi encontrado em literatura, sendo deduzido pelo autor dessa dissertação juntamente com o Sr. Pacheco [8] [9].

No capítulo 7 apresentou-se uma simulação do ensaio eh-star no programa de cálculo de motores de indução da WEG (M2E), onde foi possível comprovar a versatilidade do programa.

No capítulo 8, apresentou-se uma nova rotina de cálculo para determinação das perdas suplementares, desenvolvida pelo Sr. João Pacheco com base no método eh-star [8].

A motivação do autor para o desenvolvimento desta nova rotina foi uma consequência deste trabalho de dissertação, visto que o Sr. João Pacheco foi envolvido diretamente no entendimento do método eh-star (capítulo 6).

O procedimento para a realização do ensaio e a aplicação da nova rotina de cálculo está exemplificado no Anexo 9, que mostra os cálculos referentes aos itens 8.8 e 8.10.

É importante salientar, porém que estes resultados tiveram o objetivo de comprovar que a rotina proposta leva a um mesmo resultado que a rotina eh-star, considerando-se os mesmos dados de entrada para as duas rotinas. Os dados de entrada (Tabela 8.2) foram obtidos do ensaio eh-star de [2], cujo relatório completo está mostrado no Anexo 8.

No capítulo 9 apresentou-se o ensaio de um motor realizado pelo método alternativo, onde foi possível verificar na prática o novo método. As perdas suplementares obtidas neste ensaio foram então comparadas com as perdas suplementares obtidas no ensaio eh-star deste mesmo motor, mostrado no capítulo 4.

É importante salientar que para cada ensaio foi utilizada a rotina de cálculo própria, ou seja, para o ensaio referente ao capítulo 9 foi utilizada a rotina de cálculo proposta, enquanto que para o ensaio do capítulo 4 foi utilizada a rotina eh-star.

Nota: Os parâmetros medidos num ensaio eh-star (tensões, correntes, potência de entrada e rotação) podem ser utilizados como dados de entrada tanto para a própria rotina eh-star quanto para a rotina proposta, conforme se verificou no item 8.8. Já o inverso não é possível, ou seja, os parâmetros medidos num ensaio com o método alternativo (Figura 8.1) não podem ser utilizados como dados de entrada para a rotina eh-star visto que esta é dependente do resistor  $R_{eh}$ .

### 10.1 Artigos provenientes do trabalho de dissertação

Durante a execução deste trabalho foram escritos dois artigos, os quais foram aprovados no ICEM 2008 e MOMAG 2008:

1) A. C. Machado, J. E. de S. Pacheco, M. V. Ferreira da Luz, C. G. C. Neves e R. Carlson. **“Stray Load Losses Calculation Routine Based on the Eh-Star Method”**. Artigo aprovado no ICEM 2008 - XVIII International Conference on Electrical Machines, to be held in Vilamoura (Algarve), Portugal, from 6th-9th September 2008.

2) A. C. Machado, J. E. de S. Pacheco, M. V. Ferreira da Luz e R. Carlson. “**Circuito para Medição das Perdas Suplementares Baseado no Método Eh-Star**”. Artigo aprovado no MOMAG 2008 - evento congregando o 13º SBMO (Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica) e o 8º CBMag (Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo). O MOMAG 2008 será realizado no período de 7 a 10 de setembro de 2008, em Florianópolis, SC.

## **10.2 Propostas para trabalhos futuros**

- 1) Implementar a nova rotina nos computadores dos laboratórios elétricos da WEG com o objetivo de obter maior precisão na leitura dos parâmetros.
- 2) Fabricar rotores com diferentes características e testá-los com o mesmo estator, comparando os valores das perdas suplementares obtidos. Assim, será possível verificar experimentalmente algumas das sugestões citadas no item 2.2 deste trabalho.
- 3) Realizar ensaios com o método proposto em motores com inversor de frequência, verificando sua influência sobre as perdas suplementares.

# ANEXOS

### Anexo 1 - Corrente de teste

O item 3.5 deste trabalho apresenta a corrente de teste definida na equação (3.8). Neste primeiro anexo, será demonstrado porque esta consideração é válida [8].

No ensaio eh-star a carga é representada pela seqüência negativa. Como as perdas suplementares são proporcionais ao quadrado da corrente no rotor, pode-se considerar:

$$(I_{2-})^2 = (I_{2n})^2 \quad (A1.1)$$

$I_{2-} \rightarrow$  módulo da corrente de seqüência negativa no rotor durante o ensaio eh-star

$I_{2n} \rightarrow$  módulo da corrente no rotor em carga com tensão nominal equilibrada

Pode-se estabelecer uma relação aproximada entre os quadrados dos módulos das correntes no estator e no rotor na condição normal de carga conforme (A1.2).

$$(I_{1n})^2 = (I_{0n})^2 + k_x \cdot (I_{2n})^2 \quad (A1.2)$$

$I_{1n} \rightarrow$  módulo da corrente no estator em carga com tensão nominal equilibrada

$I_{0n} \rightarrow$  módulo da corrente no estator em vazio com tensão nominal equilibrada

$$k_x \approx 1 + \frac{X_0}{X_m} \quad (A1.3)$$

$X_0 \rightarrow$  reatância de dispersão ( $X_1 + X_2$ ) e  $X_m \rightarrow$  reatância de magnetização

A equação (A1.2) se aplica também a ambas as seqüências no funcionamento do motor em linha desequilibrada. Assim, para a seqüência negativa tem-se:

$$(I_{1-})^2 = (I_{0-})^2 + k_x \cdot (I_{2-})^2 \quad (A1.4)$$

$I_{1-} \rightarrow$  módulo da corrente de seqüência negativa no estator em carga

$I_{0-} \rightarrow$  módulo da corrente de seqüência negativa no estator em vazio

Substituindo (A1.1) em (A1.4) tem-se:

$$(I_{1-})^2 = (I_{0-})^2 + k_x \cdot (I_{2n})^2 \quad (A1.5)$$

Comparando agora (A1.2) e (A1.5) tem-se:

$$(I_{1-})^2 - (I_{0-})^2 = (I_{1n})^2 - (I_{0n})^2 \quad (A1.6)$$

Como a seqüência negativa de tensão no ensaio é bem menor que a tensão nominal na linha equilibrada, o termo  $(I_{0-})^2$  pode ser desprezado. Assim:

$$I_{1-} = \sqrt{(I_{1n})^2 - (I_{0n})^2} \quad (A1.7)$$

A equação (A1.7) comprova a veracidade da corrente de seqüência negativa representar a corrente de teste no ensaio eh-star, conforme (3.8) e (8.82).

## Anexo 2 - Temperatura inicial e final do enrolamento

O item 6.4 deste trabalho apresenta que a resistência elétrica do enrolamento de cobre do motor em teste ( $R_{vw}$ ) aumenta linearmente com a temperatura, conforme se pode observar na Figura A2.1, onde a temperatura de  $-235\text{ }^{\circ}\text{C}$  se refere à resistência nula.

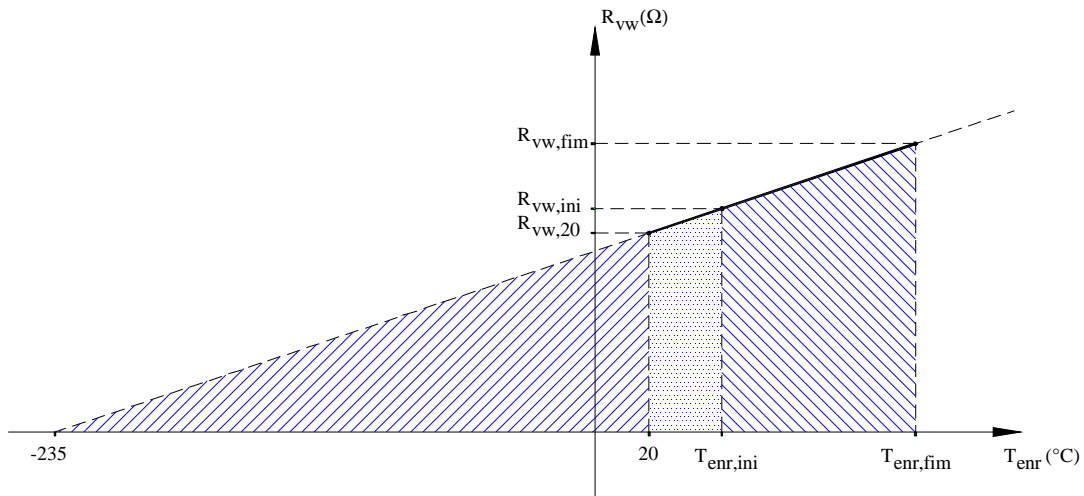


Figura A2.10.1 – Variação da resistência elétrica do cobre com a temperatura

Por semelhança de triângulos tem-se que:

$$\frac{R_{vw,20}}{235 + 20} = \frac{R_{vw,ini}}{235 + T_{enr,ini}}$$

$$R_{vw,20} \cdot (235 + T_{enr,ini}) = R_{vw,ini} \cdot (235 + 20)$$

$$T_{enr,ini} = \frac{R_{vw,ini}}{R_{vw,20}} \cdot 255 - 235 \quad (A2.1)$$

Novamente por semelhança de triângulos tem-se que:

$$\frac{R_{vw,20}}{235 + 20} = \frac{R_{vw,fim}}{235 + T_{enr,fim}}$$

$$R_{vw,20} \cdot (235 + T_{enr,fim}) = R_{vw,fim} \cdot (235 + 20)$$

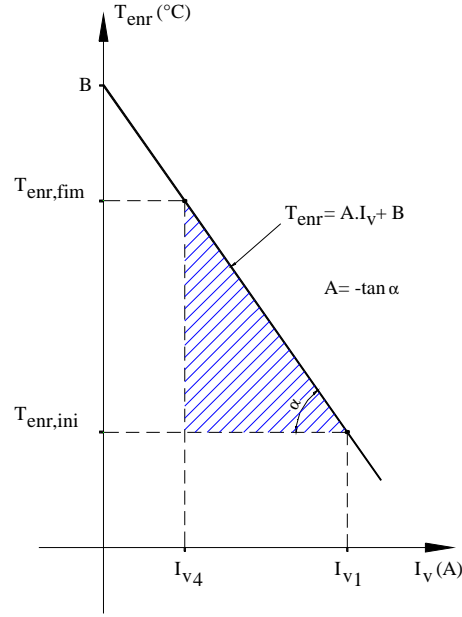
$$T_{enr,fim} = \left( \frac{R_{vw,fim}}{R_{vw,20}} \right) \cdot 255 - 235 \quad (A2.2)$$

### Anexo 3 - Regressão linear de $I_v$ x $T_{\text{enr}}$

O item 6.4 deste trabalho apresenta que a temperatura no enrolamento ( $T_{\text{enr}}$ ) varia linearmente com a corrente na fase V ( $I_v$ ) de acordo com a Figura A3.1, onde:

$I_{v_1}$  e  $T_{\text{enr,ini}}$  são a corrente e a temperatura no primeiro ponto do ensaio ( $I_{v_1} = 150\% I_{\text{Nf}}$ )

$I_{v_4}$  e  $T_{\text{enr,fim}}$  são a corrente e a temperatura no quarto ponto do ensaio ( $I_{v_4} = 113\% I_{\text{Nf}}$ )



**Figura A3.1 – Gráfico  $I_v$  x  $T_{\text{enr}}$**

Da Figura A3.1 tem-se:

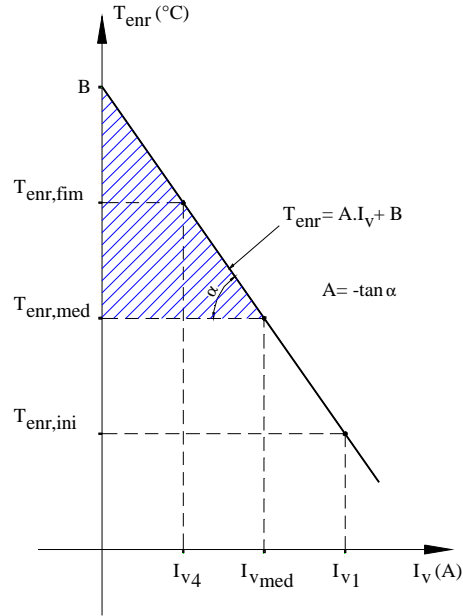
$$A = -\tan \alpha$$

$$A = -\left( \frac{T_{\text{enr,fim}} - T_{\text{enr,ini}}}{I_{v_1} - I_{v_4}} \right)$$

$$A = \frac{T_{\text{enr,ini}} - T_{\text{enr,fim}}}{I_{v_1} - I_{v_4}} \quad (\text{A3.1})$$



A intersecção B é determinada a partir da Figura A3.2:



**Figura A3.2 – Determinação da intersecção B**

$$T_{\text{enr,med}} = \frac{T_{\text{enr,ini}} + T_{\text{enr,fim}}}{2}$$

$$I_{v\text{med}} = \frac{I_{v1} + I_{v4}}{2}$$

Da Figura A3.2 tem-se:

$$\tan \alpha = \frac{B - T_{\text{enr,med}}}{I_{v\text{med}}}$$

$$-A = \frac{B - T_{\text{enr,med}}}{I_{v\text{med}}}$$

$$B = T_{\text{enr,med}} - A \cdot I_{v\text{med}}$$

$$B = \left( \frac{T_{\text{enr,ini}} + T_{\text{enr,fim}}}{2} \right) - A \cdot \left( \frac{I_{v1} + I_{v4}}{2} \right) \quad (\text{A3.2})$$

#### Anexo 4 - Relação entre tensão de fase e de linha num sistema trifásico

O item 6.7 deste trabalho apresenta a relação entre as tensões de fase e de linha das seqüências positiva e negativa de um sistema trifásico.

Para demonstrar esta relação considere-se a Figura A4.1, que mostra o diagrama vetorial das tensões de fase e de linha de um sistema trifásico equilibrado. Os três valores de tensão são iguais entre si e a tensão de linha está defasada de  $30^\circ$  da tensão de fase.

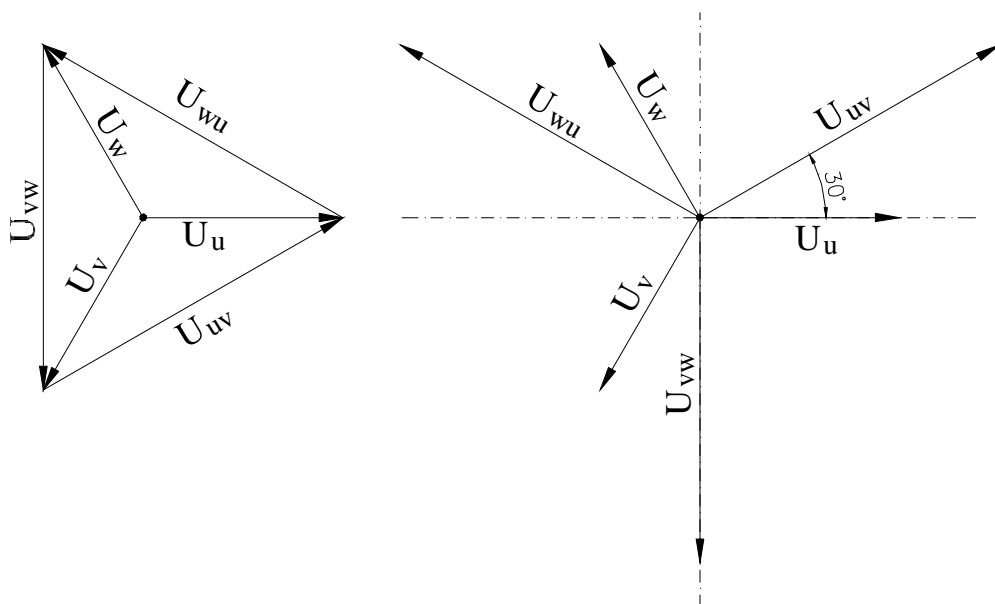


Figura A4.1 – Diagrama vetorial das tensões de fase e de linha de um sistema trifásico

Tensões de fase:  $U_u$ ,  $U_v$  e  $U_w$

Tensões de linha:  $U_{uv}$ ,  $U_{vw}$  e  $U_{wu}$

$$U_{uv} = U_u - U_v \quad U_{vw} = U_v - U_w \quad U_{wu} = U_w - U_u$$

Da teoria de componentes simétricas pode-se definir a seqüência positiva das tensões de fase  $U_{F+}$  e de linha  $U_{L+}$ , tomando como referência  $U_u$  e  $U_{uv}$ , respectivamente:

$$U_{F+} = \frac{1}{3} \cdot (U_u + a \cdot U_v + a^2 \cdot U_w)$$

$$U_{L+} = \frac{1}{3} \cdot (U_{uv} + a \cdot U_{vw} + a^2 \cdot U_{wu})$$

Onde:  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$

Substituindo em  $U_{L+}$  as tensões de linha pelas relações com as tensões de fase:

$$3 \cdot U_{L+} = (U_u - U_v) + a \cdot (U_v - U_w) + a^2 \cdot (U_w - U_u)$$

$$3 \cdot U_{L+} = U_u \cdot (1 - a^2) + U_v \cdot (a - 1) + U_w \cdot (a^2 - a)$$

Como  $a^3 = e^{j2\pi} = 1$  e  $a^4 = e^{j\frac{8\pi}{3}} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = a$ , pode-se fazer o seguinte:

$$3 \cdot U_{L+} = U_u \cdot (1 - a^2) + U_v \cdot (1 - a^2) \cdot a + U_w \cdot (1 - a^2) \cdot a^2$$

$$3 \cdot U_{L+} = (U_u + a \cdot U_v + a^2 \cdot U_w) \cdot (1 - a^2)$$

$$3 \cdot U_{L+} = 3 \cdot U_{F+} \cdot (1 - a^2)$$

$$U_{L+} = U_{F+} \cdot (1 - a^2)$$

Desenvolvendo matematicamente a expressão  $1 - a^2$ , tem-se:

$$1 - a^2 = 1 - e^{j\frac{4\pi}{3}} = 1 - \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) - j \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) = 1 + 0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2} = 1,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{3}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Pode-se fazer a seguinte simplificação:

$$1 - a^2 = \sqrt{3} \cdot \left( \frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} \right) = \sqrt{3} \cdot \left( \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) + j \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) \right) = \sqrt{3} \cdot e^{j\frac{\pi}{6}}$$

Assim:

$$U_{L+} = U_{F+} \cdot \sqrt{3} \cdot e^{j\frac{\pi}{6}} \quad \rightarrow \quad U_{F+} = \frac{U_{L+}}{\sqrt{3}} \cdot e^{-j\frac{\pi}{6}} \quad (A4.1)$$

Semelhantemente para a sequência negativa pode-se demonstrar que:

$$U_{L-} = U_{F-} \cdot \sqrt{3} \cdot e^{-j\frac{\pi}{6}} \quad \rightarrow \quad U_{F-} = \frac{U_{L-}}{\sqrt{3}} \cdot e^{j\frac{\pi}{6}} \quad (A4.2)$$

### Anexo 5 - Relação entre as tensões de fase e suas respectivas componentes

O item 6.8 deste trabalho apresenta a relação entre as tensões de fase de um sistema trifásico e as respectivas componentes de sequência positiva e negativa.

Para se demonstrar esta relação parte-se das seguintes equações:

$$3 \cdot U_{F+} = U_u + a \cdot U_v + a^2 \cdot U_w \quad (1)$$

$$3 \cdot U_{F-} = U_u + a^2 \cdot U_v + a \cdot U_w \quad (2)$$

Onde:  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$

$U_{F+} \rightarrow$  componente de sequência positiva da tensão de fase

$U_{F-} \rightarrow$  componente de sequência negativa da tensão de fase

$U_u, U_v, U_w \rightarrow$  tensões de fase

Para obter a relação entre  $U_u, U_{F+}$  e  $U_{F-}$  soma-se (1) + (2):

$$3 \cdot (U_{F+} + U_{F-}) = 2 \cdot U_u + (a + a^2) \cdot (U_v + U_w)$$

Resolvendo  $a + a^2$  tem-se:

$$a + a^2 = e^{j\frac{2\pi}{3}} + e^{j\frac{4\pi}{3}} = \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + j \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) + j \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right)$$

$$a + a^2 = -0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2} - 0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2} = -1$$

Como a componente de sequência zero é nula, tem-se:

$$U_u + U_v + U_w = 0$$

Assim, retornando à expressão inicial tem-se:

$$3 \cdot (U_{F+} + U_{F-}) = 2 \cdot U_u + (-1) \cdot (-U_u)$$

$$3 \cdot (U_{F+} + U_{F-}) = 3 \cdot U_u$$

Assim

$$U_u = U_{F+} + U_{F-} \quad (A5.1)$$

Para obter a relação entre  $U_v$ ,  $U_{F+}$  e  $U_{F-}$  soma-se  $a^2 \cdot (1) + a \cdot (2)$ :

$$3 \cdot (a^2 \cdot U_{F+} + a \cdot U_{F-}) = (a^2 + a) \cdot U_u + (a^3 + a^3) \cdot U_v + (a^4 + a^2) \cdot U_w$$

Como  $a^4 = e^{j\frac{8\pi}{3}} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = a$ , tem-se que  $a^4 + a^2 = a + a^2 = -1$ . Então:

$$3 \cdot (a^2 \cdot U_{F+} + a \cdot U_{F-}) = (-1) \cdot U_u + 2a^3 \cdot U_v + (-1) \cdot U_w$$

Como  $a^3 = e^{j2\pi} = 1$ , tem-se:

$$3 \cdot (a^2 \cdot U_{F+} + a \cdot U_{F-}) = 2 \cdot U_v - (U_u + U_w)$$

$$3 \cdot (a^2 \cdot U_{F+} + a \cdot U_{F-}) = 2 \cdot U_v - (-U_v)$$

$$3 \cdot (a^2 \cdot U_{F+} + a \cdot U_{F-}) = 3 \cdot U_v$$

Assim

$$U_v = a^2 \cdot U_{F+} + a \cdot U_{F-} \quad (A5.2)$$

Para obter a relação entre  $U_w$ ,  $U_{F+}$  e  $U_{F-}$  soma-se  $a \cdot (1) + a^2 \cdot (2)$ :

$$3 \cdot (a \cdot U_{F+} + a^2 \cdot U_{F-}) = (a + a^2) \cdot U_u + (a^2 + a^4) \cdot U_v + (a^3 + a^3) \cdot U_w$$

$$3 \cdot (a \cdot U_{F+} + a^2 \cdot U_{F-}) = (-1) \cdot U_u + (-1) \cdot U_v + 2a^3 \cdot U_w$$

$$3 \cdot (a \cdot U_{F+} + a^2 \cdot U_{F-}) = 2 \cdot U_w - (U_u + U_v)$$

$$3 \cdot (a \cdot U_{F+} + a^2 \cdot U_{F-}) = 2 \cdot U_w - (-U_w)$$

$$3 \cdot (a \cdot U_{F+} + a^2 \cdot U_{F-}) = 3 \cdot U_w$$

Assim

$$U_w = a \cdot U_{F+} + a^2 \cdot U_{F-} \quad (A5.3)$$

## Anexo 6 - Resistência do estator de fase e de linha

O item 8.4.7 deste trabalho apresenta que as perdas Joule no estator podem ser determinadas a partir da corrente e da resistência de linha (comumente chamada de resistência de ligação), independente dos enrolamentos estarem ligados em estrela ou triângulo (delta). Isto pode ser demonstrado conforme segue:

### A6.1 – Enrolamentos do estator ligados em estrela (Y)

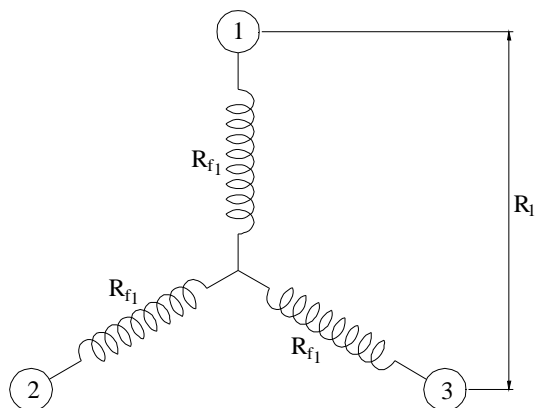


Figura A6.1 – Enrolamento trifásico ligado em estrela

Na Figura A6.1, a resistência de linha  $R_l$  é o dobro da resistência de fase  $R_{f1}$ .

Assim:

$$R_l = 2 \cdot R_{f1} \quad \rightarrow \quad R_{f1} = \frac{R_l}{2} \quad (\text{A6.1})$$

Como a corrente de linha ( $I$ ) é igual à de fase ( $I_f$ ), tem-se que:

$$P_{j1} = 3 \cdot R_{lf} \cdot I_f^2 = 3 \cdot \frac{R_l}{2} \cdot I^2 = 1,5 \cdot R_l \cdot I^2$$

Onde

$P_{j1} \rightarrow$  perdas Joule no estator

### A6.2 - Enrolamentos do estator ligados em triângulo (delta)

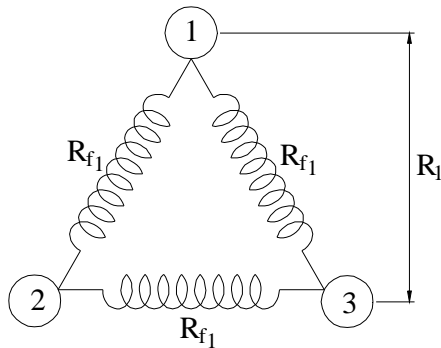


Figura A6.2 – Enrolamento trifásico ligado em triângulo (delta)

Na Figura A6.2, a resistência de linha  $R_l$  resulta do paralelo entre  $R_{f1}$  e  $2R_{f1}$ .

$$R_l = \frac{R_{f1} \cdot 2R_{f1}}{R_{f1} + 2R_{f1}} = \frac{2(R_{f1})^2}{3R_{f1}}$$

Assim

$$R_l = \frac{2}{3} R_{f1} \quad \rightarrow \quad R_{f1} = \frac{3}{2} R_l \quad (A6.2)$$

Agora a relação entre as correntes de linha e de fase é  $I = \sqrt{3} \cdot I_f$ , então:

$$P_{j1} = 3 \cdot R_{f1} \cdot I_f^2 = 3 \cdot \frac{3}{2} R_l \cdot \left( \frac{I}{\sqrt{3}} \right)^2 = 1,5 \cdot R_l \cdot I^2$$

Conclusão: o cálculo de  $P_{j1}$  utilizando a resistência de ligação e a corrente de linha independe da ligação do motor ser estrela ou triângulo (delta).

### Anexo 7 - Relação entre as tensões de fase e de linha para as duas seqüências

O item 8.4.8 deste trabalho apresenta a relação entre os módulos das tensões de fase e de linha para as seqüências positiva e negativa.

Para demonstrar isto, deve-se tomar na Figura 8.7 as relações entre as tensões de fase e de linha conforme segue:

$$V_1 = V_{f3} - V_{f2} \quad V_2 = V_{f1} - V_{f3} \quad V_3 = V_{f2} - V_{f1}$$

De (8.1) tem-se:

$$\begin{aligned} 3 \cdot V_+ &= V_1 + V_2 / \theta + V_3 \cdot \theta \\ 3 \cdot V_+ &= (V_{f3} - V_{f2}) + (V_{f1} - V_{f3}) / \theta + (V_{f2} - V_{f1}) \cdot \theta \\ 3 \cdot V_+ &= V_{f1} \cdot (1/\theta - \theta) + V_{f2} \cdot (\theta - 1) + V_{f3} \cdot (1 - 1/\theta) \end{aligned}$$

Onde  $\theta = e^{j\frac{2\pi}{3}}$

Considerando as relações em (8.4) tem-se:

$$\begin{aligned} 3 \cdot V_+ &= V_{f1} \cdot (1/\theta - \theta) + V_{f2} \cdot (1/\theta - \theta) / \theta + V_{f3} \cdot (1/\theta - \theta) \cdot \theta \\ 3 \cdot V_+ &= (V_{f1} + V_{f2} / \theta + V_{f3} \cdot \theta) \cdot (1/\theta - \theta) \\ 3 \cdot V_+ &= 3 \cdot V_{f+} \cdot (1/\theta - \theta) \\ V_+ &= V_{f+} (1/\theta - \theta) \end{aligned} \tag{A7.1}$$

De (8.3) tem-se:

$$(1/\theta - \theta) = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = -j\sqrt{3}$$

Substituindo em (A7.1) tem-se:

$$V_+ = -j\sqrt{3} \cdot V_{f+} \tag{A7.2}$$

Assim

$$|V_+|^2 = 3 \cdot |V_{f+}|^2 \tag{A7.3}$$

De (A7.2) pode-se deduzir que:

$$V_{f+} = \frac{V_+}{-j\sqrt{3}}$$

Assim

$$V_{f+} = j\frac{\sqrt{3}}{3} V_+ \tag{A7.4}$$



Usando o mesmo raciocínio para a sequência negativa, de (8.2) tem-se:

$$\begin{aligned} 3 \cdot V_- &= V_1 + V_2 \cdot \theta + V_3 / \theta \\ 3 \cdot V_- &= (V_{f3} - V_{f2}) + (V_{f1} - V_{f3}) \cdot \theta + (V_{f2} - V_{f1}) / \theta \\ 3 \cdot V_- &= V_{f1} \cdot (\theta - 1/\theta) + V_{f2} \cdot (1/\theta - 1) + V_{f3} \cdot (1 - \theta) \end{aligned}$$

Considerando as relações em (8.4):

$$\begin{aligned} 3 \cdot V_- &= V_{f1} \cdot (\theta - 1/\theta) + V_{f2} \cdot (\theta - 1/\theta) \cdot \theta + V_{f3} \cdot (\theta - 1/\theta) / \theta \\ 3 \cdot V_- &= (V_{f1} + V_{f2} \cdot \theta + V_{f3} / \theta) \cdot (\theta - 1/\theta) \\ 3 \cdot V_- &= 3 \cdot V_{f-} \cdot (\theta - 1/\theta) \\ V_- &= V_{f-} (\theta - 1/\theta) \end{aligned} \tag{A7.5}$$

De (8.3) tem-se:

$$(\theta - 1/\theta) = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = j\sqrt{3}$$

Substituindo em (A7.5) tem-se:

$$V_- = j\sqrt{3} \cdot V_{f-} \tag{A7.6}$$

Assim

$$|V_-|^2 = 3 \cdot |V_{f-}|^2 \tag{A7.7}$$

De (A7.6) pode-se deduzir que:

$$V_{f-} = \frac{V_-}{j\sqrt{3}}$$

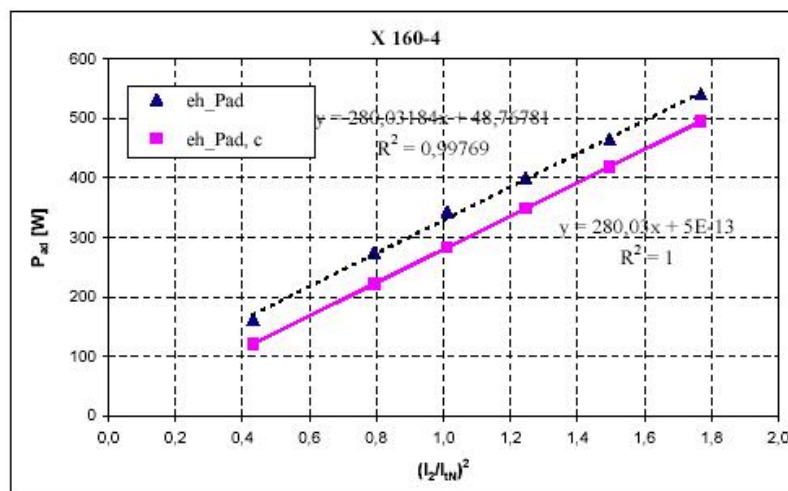
Assim

$$V_{f-} = -j\frac{\sqrt{3}}{3} V_- \tag{A7.8}$$

# Anexo 8 – Planilha com resultados do ensaio eh-star do motor 11 kW da ref. [2]

Evaluation of eh-star-test, guideline			X160-4				16.11.2004	
Algorithm written by A. Binder/Darmstadt University of Technology 2004								
	$t_{av}=2.4s$	load point	1	2	3	4	5	6
Input	rated line-line voltage	$U_N [V]$	400,0	400,0	400,0	400,0	400,0	400,0
	rated line current	$I_N [A]$	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5
	no-load line current	$I_0 [A]$	7,774	7,774	7,774	7,774	7,774	7,774
	frequency	$f [Hz]$	50	50	50	50	50	50
	number of poles	$2p$	4	4	4	4	4	4
	line-line voltage	$U_{UV} [V]$	218,01	206,41	193,86	180,28	165,31	132,22
data	line-line voltage	$U_{VW} [V]$	241,17	228,01	213,99	198,83	182,42	145,38
	line-line voltage	$U_{WU} [V]$	56,97	52,4	47,87	43,09	38,41	28
	phase current	$I_{UpH} [A]$	28,62	26,405	24,155	21,84	19,4	14,473
	phase current	$I_{VpH} [A]$	33,623	30,896	28,165	25,378	22,495	16,716
	phase current	$I_{WpH} [A]$	23,059	21,151	19,258	17,273	15,249	11,061
	input power	$P_{e,0} [W]$	3027,1	2635,3	2240,9	1865,3	1498,2	873,4
	speed	$n [rpm]$	1468,7	1467,7	1467,1	1466,9	1466,8	1467,5
	phase resistance @ 20°C	$R_s, 20^{\circ}C [\Omega]$	0,3349	0,3349	0,3349	0,3349	0,3349	0,3349
	line-line resistance @ 20°C	$R_{VW, 20^{\circ}C} [\Omega]$	0,6711261					
	line-line resistance @ begin	$R_{VW, begin} [\Omega]$	0,704712					
	line-line resistance @ end	$R_{VW, end} [\Omega]$	0,7640442					
	core losses	$P_{FeN} [W]$	245,31	245,31	245,31	245,31	245,31	245,31
	friction & windage losses	$P_{mN} [W]$	62,831	62,831	62,831	62,831	62,831	62,831

Output	eh-resistance (operating)	$R_{oh} [\Omega]$	2,4706	2,4774	2,4857	2,4946	2,5189	2,5314
	winding temperature	temp [°C]	32,76	40,22	47,68	55,30	55,30	55,30
	positive sequence current	$I_1 [A]$	6,0408	5,5591	5,0713	4,6060	4,1124	3,2026
	negative sequence current	$I_2 [A]$	28,0804	25,8258	23,5638	21,2277	18,8062	13,8874
	ratio (positive/negative)	$I_1 / I_2$	0,2151	0,2153	0,2152	0,2170	0,2187	0,2306
	rated test current	$I_N [A]$	21,1143	21,1143	21,1143	21,1143	21,1143	21,1143
data								
	stray load losses	$P_{ad} [W]$	540,7718	464,0026	398,9044	342,0790	274,5187	161,6868
	check of real power	$P_{kont} [W]$	3029,4738	2637,4333	2242,7634	1866,8513	1499,2432	873,9784
		$(I_2 / I_N)^2$	1,7687	1,4961	1,2455	1,0108	0,7933	0,4326
	stray load losses @ $I_N$	Intercept $B$	48,7678		Slope $A$	280,0318	Correlat. Fact	0,99884
	corrected stray load losses	$P_{ad, c} [W]$	495,2888	418,9492	348,7746	283,0465	222,1551	121,1423



### Anexo 9 - Exemplo de ensaio e cálculo com a rotina proposta (software Mathcad)

Os itens 8.8 e 8.10 deste trabalho apresentam resultados de perdas suplementares determinados pela rotina proposta, considerando como dados de entrada os parâmetros do ensaio eh-star do motor 11 kW, 4 pólos, 400 V, 50 Hz, carcaça IEC 160M [2].

O primeiro resultado está apresentado na Tabela 8.4 e Figura 8.9 e o segundo na Tabela 8.7 e Figura 8.11.

A seqüência de cálculos está exposta a seguir em uma rotina Mathcad, destacando entre parênteses os números das equações colocadas neste trabalho de dissertação.

#### Depto de Pesquisa e Desenvolvimento do Produto - WEG Motores - Jan/08

Autor da rotina em Mathcad..... : Adilson Carlos Machado

Autor da metodologia de cálculo: João Evangelista Pacheco de Souza

#### ENSAIO PARA MEDIÇÃO DAS PERDAS SUPLEMENTARES - baseado no método EH-STAR

*Motor alimentado com duas fases e o neutro de um gerador trifásico*

*Este método independe da ligação do motor ser estrela ou triângulo*

Verificação do procedimento de cálculo proposto utilizando como dados de entrada os parâmetros do ensaio eh-star do motor 11 kW, 4 pólos, 400 V, 50 Hz, carcaça IEC 160M [2].

O relatório original do ensaio eh-star em planilha Excel é apresentado no Anexo 8 da dissertação de mestrado. No item 8.8 deste mesmo trabalho mostra-se alguns dos resultados obtidos a seguir.

Ref.[2]: BINDER A.; AOULKADI M.; *Guideline Eh-Star-Circuit for Stray Loss measurement*  
Darmstadt University of Technology, Germany, March of 2005

#### Dados nominais do motor :

Polaridade.....: polos := 4

Frequência nominal.....: freq := 50

Tensão nominal de linha.: Vn := 400

Corrente nominal de linha: In := 22.5  $rpms := \frac{120 \cdot freq}{polos}$

Rotação nominal.....: rpmn := 1465  $rpms = 1500$

#### Ligação (Lig):

1 = estrela

2 = delta

Lig := 1

Tensão de fase:  $V_f := \begin{cases} \frac{V_n}{\sqrt{3}} & \text{if Lig} = 1 \\ V_n & \text{otherwise} \end{cases}$

Vf = 231

#### Dados do ensaio em vazio :

Corrente de linha.....: Io := 7.774

Perdas no ferro.....: Pfe := 245.31

Perdas mecânicas.....: Pmec := 62.831

Resistências de ligação a frio: Rlig\_frio := (0.6711261 0.6711261 0.6711261)

Temperatura ambiente.....: Tamb := 20

Parametros marcados em:  
Amarelo : dados de entrada  
Azul : dados calculados

#### Conversão da resistência a frio para temperatura ambiente de 20 °C :

$R_{lig\_20} := R_{lig\_frio} \left( \frac{255}{235 + T_{amb}} \right)$   $R_{lig\_20} = (0.6711261 \ 0.6711261 \ 0.6711261)$   
 $R_{20} := \text{mean}(R_{lig\_20})$   $R_{20} = 0.6711261$

**Procedimentos de ensaio :**

- 1) Alimentar o motor em vazio com tensão nominal por aproximadamente 20 minutos para estabilizar as perdas.
- 2) Medir as resistências de ligação (não precisa anotar a temperatura ambiente).  
A média será a resistência inicial (Rini):

$$R_{lig\_ini} := (0.704712 \ 0.704712 \ 0.704712)$$

$$R_{ini} := \text{mean}(R_{lig\_ini}) \quad R_{ini} = 0.704712$$

- 3) Determinar as correntes de referência para os seis pontos do ensaio:  
150%, 138%, 125%, 113%, 100% e 75% de  $I_n$  (percentuais indicados em [2]).  
Nota: A variação decrescente da corrente é indicada para limitar a variação de temperatura.

$$I_{ref} := (1.5 I_n \ 1.38 I_n \ 1.25 I_n \ 1.13 I_n \ I_n \ 0.75 I_n)$$

$$I_{ref} = (33.75 \ 31.05 \ 28.13 \ 25.42 \ 22.5 \ 16.88)$$

- 4) Conectar o motor à duas fases e o neutro do gerador, observando as seguintes ligações:
  - Fase R do gerador alimenta cabo U1 do motor
  - Fase S do gerador alimenta cabo V1 do motor
  - Neutro do gerador alimenta cabo W1 do motor

Nota: Esta conexão foi executada no Lab I da WEG Motores
- 5) Alimentar o motor com uma tensão inicial em torno de 40% da nominal, ajustando em seguida a tensão para que a corrente de linha  $I_v$  corresponda à corrente de referência de cada ponto.
- 6) Medir para cada ponto do ensaio:  
Tensões ( $U_{uv}$ ,  $U_{vw}$  e  $U_{wu}$ ), correntes ( $I_u$ ,  $I_v$  e  $I_w$ ), potência de entrada ( $P_e$ ) e rotação (rpm).

Na tabela **dados** abaixo, as colunas correspondem aos seis pontos de ensaio e as linhas correspondem às medições, onde:

1ª à 3ª linhas: tensões  $U_{uv}$ ,  $U_{vw}$  e  $U_{wu}$

4ª à 6ª linhas: correntes  $I_u$ ,  $I_v$  e  $I_w$

7ª e 8ª linhas: potência de entrada ( $P_e$ ) e rotação (rpm).

dados :=	241.17	228.01	213.99	198.83	182.42	145.38
	218.01	206.41	193.86	180.28	165.31	132.22
	56.97	52.4	47.87	43.09	38.41	28
	23.059	21.151	19.258	17.273	15.249	11.061
	33.623	30.896	28.165	25.378	22.495	16.716
	28.62	26.405	24.155	21.84	19.4	14.473
	3027.1	2635.3	2240.9	1865.3	1498.2	873.4
	1468.7	1467.7	1467.1	1466.9	1466.8	1467.5

Nota:

Como a nova rotina foi desenvolvida com o sentido de rotação contrário ao da rotina eh-star, foi preciso inverter dois pontos de tensão e corrente em relação à tabela original do artigo de referência:  $U_{uv}$  por  $U_{vw}$  e  $I_u$  por  $I_w$ .

Ver nota no item 8.4.3 da dissertação

- 7) Desligar o gerador e medir as resistências (não precisa anotar a temperatura ambiente).  
A média será a resistência final (Rfim):

$$R_{lig\_fim} := (0.7640442 \ 0.7640442 \ 0.7640442)$$

$$R_{fim} := \text{mean}(R_{lig\_fim}) \quad R_{fim} = 0.7640442$$

**Procedimentos de cálculo:**

Os números entre parênteses se referem às equações do trabalho de dissertação

**1) Determinação da corrente nominal de teste:**

$$I_{tn} := \sqrt{I_n^2 - I_o^2} \quad I_{tn} = 21.11 \quad (8.82)$$

**2) Determinação da resistência de perdas no ferro:**

$$R_{fe} := \frac{3V_f^2}{P_{fe}} \quad R_{fe} = 652.24 \quad (6.19)$$

**3) Determinação das temperaturas inicial e final dos enrolamentos:**

$$T_{enr\_ini} := \frac{R_{ini}}{R_{20}} \cdot 255 - 235 \quad T_{enr\_ini} = 32.76 \quad (6.13)$$

$$T_{enr\_fim} := \frac{R_{fim}}{R_{20}} \cdot 255 - 235 \quad T_{enr\_fim} = 55.31 \quad (6.14)$$

**4) Regressão linear de  $I_v$  x  $T_{enr}$  considerando os quatro primeiros pontos do ensaio ( $I_v = 150\%$  a  $113\%$  de  $I_n$ ). Para os dois últimos pontos (100% e 75%) é considerado  $T_{enr\_fim}$ .**

$$a := \frac{T_{enr\_ini} - T_{enr\_fim}}{\text{dados}_{5,1} - \text{dados}_{5,4}}$$

$$b := \left( \frac{T_{enr\_ini} + T_{enr\_fim}}{2} \right) - a \cdot \left( \frac{\text{dados}_{5,1} + \text{dados}_{5,4}}{2} \right) \quad \begin{array}{l} a = -2.7342 \\ b = 124.6944 \end{array}$$

$$T_{enr} := \begin{cases} \text{for } j \in 1..6 \\ \quad \left| \begin{array}{l} T_{enr_{1,j}} \leftarrow a \cdot \text{dados}_{5,j} + b \text{ if } j \leq 4 \\ T_{enr_{1,j}} \leftarrow T_{enr\_fim} \text{ if } j \geq 5 \end{array} \right. \\ T_{enr} \end{cases} \quad (6.17)$$

$$T_{enr} = (32.76 \ 40.22 \ 47.68 \ 55.31 \ 55.31 \ 55.31)$$

**5) Determinação da resistência do enrolamento para cada ponto:**

$$R_{enr\_lig} := \begin{cases} \text{for } j \in 1..6 \\ \quad \left| \begin{array}{l} R_{enr\_lig_{1,j}} \leftarrow R_{20} \left( 1 + 0.00393 T_{enr_{1,j}} \right) \\ R_{enr\_lig} \end{array} \right. \end{cases} \quad (6.18)$$

$$R_{enr\_lig} = (0.7575 \ 0.7772 \ 0.7969 \ 0.8170 \ 0.8170 \ 0.8170)$$

## 6) Determinação do escorregamento:

$$s := \begin{cases} \text{for } j \in 1..6 \\ s_{1,j} \leftarrow \frac{rpms - \text{dados}_{8,j}}{rpms} \\ s \end{cases}$$

$$s = (0.02087 \ 0.02153 \ 0.02193 \ 0.02207 \ 0.02213 \ 0.02167)$$

## 7) Correção das perdas mecânicas:

$$P_{mecc} := \begin{cases} \text{for } j \in 1..6 \\ P_{mecc_{1,j}} \leftarrow (1 - s_{1,j})^2 \cdot P_{mec} \\ P_{mecc} \end{cases} \quad (6.41)$$

$$P_{mec} = 62.831$$

$$P_{mecc} = (60.236 \ 60.154 \ 60.105 \ 60.089 \ 60.080 \ 60.138)$$

## 8) Funções auxiliares:

$$Pa(g_1, g_2, g_3) := \frac{1}{6} \cdot (g_1^2 + g_2^2 + g_3^2) \quad (8.14)$$

$$Pb(g_1, g_2, g_3) := \frac{1}{6} \cdot \sqrt{3 \cdot (g_1^2 + g_2^2 + g_3^2)^2 - 6 \cdot (g_1^4 + g_2^4 + g_3^4)} \quad (8.19)$$

## 9) Cálculos preliminares:

$$I := \begin{cases} \text{for } j \in 1..6 \\ I_{1,j} \leftarrow 2 \cdot Pa(\text{dados}_{4,j}, \text{dados}_{5,j}, \text{dados}_{6,j}) \\ I \end{cases} \quad (8.39a)$$

$$I\delta := \begin{cases} \text{for } j \in 1..6 \\ I\delta_{1,j} \leftarrow -2 \cdot Pb(\text{dados}_{4,j}, \text{dados}_{5,j}, \text{dados}_{6,j}) \\ I\delta \end{cases} \quad (8.42a)$$

Nota:  $I\delta$  é negativo devido à corrente de seqüência negativa predominar sobre a positiva.

$$V := \begin{cases} \text{for } j \in 1..6 \\ V_{1,j} \leftarrow 2 \cdot Pa(\text{dados}_{1,j}, \text{dados}_{2,j}, \text{dados}_{3,j}) \\ V \end{cases} \quad (8.39b)$$

$$V\delta := \begin{cases} \text{for } j \in 1..6 \\ V\delta_{1,j} \leftarrow 2 \cdot Pb(\text{dados}_{1,j}, \text{dados}_{2,j}, \text{dados}_{3,j}) \\ V\delta \end{cases} \quad (8.42b)$$

$$VI := \left| \begin{array}{l} \text{for } j \in 1..6 \\ VI_{1,j} \leftarrow (dados_{2,j})^2 \cdot (dados_{4,j})^2 + (dados_{3,j})^2 \cdot (dados_{5,j})^2 + (dados_{1,j})^2 \cdot (dados_{6,j})^2 \\ VI \end{array} \right.$$

$$qd := \left| \begin{array}{l} \text{for } j \in 1..6 \\ qd_{1,j} \leftarrow 4.5 \cdot V_{1,j} \cdot I_{1,j} + 1.5 \cdot V\delta_{1,j} \cdot I\delta_{1,j} - VI_{1,j} \\ qd \end{array} \right. \quad (8.77)$$

$$uv := \left| \begin{array}{l} \text{for } j \in 1..6 \\ uv_{1,j} \leftarrow (dados_{1,j})^2 \cdot \left[ (dados_{4,j})^2 - (dados_{5,j})^2 \right] \\ uv \end{array} \right.$$

$$vw := \left| \begin{array}{l} \text{for } j \in 1..6 \\ vw_{1,j} \leftarrow (dados_{2,j})^2 \cdot \left[ (dados_{5,j})^2 - (dados_{6,j})^2 \right] \\ vw \end{array} \right.$$

$$wu := \left| \begin{array}{l} \text{for } j \in 1..6 \\ wu_{1,j} \leftarrow (dados_{3,j})^2 \cdot \left[ (dados_{6,j})^2 - (dados_{4,j})^2 \right] \\ wu \end{array} \right.$$

$$qr := \left| \begin{array}{l} \text{for } j \in 1..6 \\ qr_{1,j} \leftarrow \frac{1.5 \cdot (V_{1,j} \cdot I\delta_{1,j} + V\delta_{1,j} \cdot I_{1,j})}{qd_{1,j}} \\ qr \end{array} \right. \quad (8.61)$$

$$qr = (-0.5549 \ -0.5608 \ -0.5668 \ -0.5708 \ -0.5744 \ -0.5715)$$

$$qx := \left| \begin{array}{l} \text{for } j \in 1..6 \\ qx_{1,j} \leftarrow \frac{uv_{1,j} + vw_{1,j} + wu_{1,j}}{\sqrt{3} \cdot qd_{1,j}} \\ qx \end{array} \right. \quad (8.74)$$

$$qx = (-0.2555 \ -0.2582 \ -0.2604 \ -0.2646 \ -0.2679 \ -0.2803)$$

10) Determinação das correntes de seqüência positiva e negativa:

$$\text{Ipos} := \left| \begin{array}{l} \text{for } j \in 1..6 \\ \text{Ipos}_{1,j} \leftarrow \sqrt{\frac{I_{1,j} + I\delta_{1,j}}{2}} \\ \text{Ipos} \end{array} \right. \quad (8.57)$$

$$\text{Ipos} = (6.1546 \ 5.6669 \ 5.1723 \ 4.6996 \ 4.1980 \ 3.2700)$$

$$\text{Ineg} := \left| \begin{array}{l} \text{for } j \in 1..6 \\ \text{Ineg}_{1,j} \leftarrow \sqrt{\frac{I_{1,j} - I\delta_{1,j}}{2}} \\ \text{Ineg} \end{array} \right. \quad (8.58)$$

$$\text{Ineg} = (28.0932 \ 25.8380 \ 23.5750 \ 21.2377 \ 18.8153 \ 13.8943)$$

11) Determinação da corrente eficaz:

$$\text{Ief} := \left| \begin{array}{l} \text{for } j \in 1..6 \\ \text{Ief}_{1,j} \leftarrow \sqrt{(Ipos_{1,j})^2 + (Ineg_{1,j})^2} \\ \text{Ief} \end{array} \right. \quad (8.83)$$

$$\text{Ief} = (28.7595 \ 26.4522 \ 24.1357 \ 21.7515 \ 19.2779 \ 14.2740)$$

12) Determinação da relação entre as correntes de sequencia positiva e negativa:

$$\text{Ipn} := \left| \begin{array}{l} \text{for } j \in 1..6 \\ \text{Ipn}_{1,j} \leftarrow \frac{Ipos_{1,j}}{Ineg_{1,j}} \\ \text{Ipn} \end{array} \right.$$

$$\text{Ipn} = (0.2191 \ 0.2193 \ 0.2194 \ 0.2213 \ 0.2231 \ 0.2353)$$

13) Determinação do fator k:

$$k := \left| \begin{array}{l} \text{for } j \in 1..6 \\ k_{1,j} \leftarrow \frac{1}{1 + (Ipn_{1,j})^2} \\ k \end{array} \right. \quad (6.46)$$

$$k = (0.9542 \ 0.9541 \ 0.9541 \ 0.9533 \ 0.9526 \ 0.9475)$$



14) Determinação da potência reativa:

$$Q_e := \begin{cases} \text{for } j \in 1..6 \\ Q_{e1,j} \leftarrow \sqrt{q_{d1,j} - (dados_{7,j})^2} \\ Q_e \end{cases} \quad (8.79)$$

$$Q_e = (5829 \ 5095 \ 4393 \ 3711 \ 3045 \ 1848)$$

15) Determinação da diferença entre as potências de entrada das seqüências positiva e negativa:

$$\Delta P_e := \begin{cases} \text{for } j \in 1..6 \\ \Delta P_{e1,j} \leftarrow q_{r1,j} \cdot dados_{7,j} - q_{x1,j} \cdot Q_{e1,j} \\ \Delta P_e \end{cases} \quad (8.78)$$

$$\Delta P_e = (-190 \ -162 \ -126 \ -83 \ -45 \ 19)$$

16) Determinação da diferença entre as perdas Joule no estator das seqüências positiva e negativa:

$$\Delta P_{j1} := \begin{cases} \text{for } j \in 1..6 \\ \Delta P_{j1,j} \leftarrow 1.5 \text{Renr\_lig}_{1,j} \cdot I_{\delta 1,j}^2 \\ \Delta P_{j1} \end{cases}$$

$$\Delta P_{j1} = (-854 \ -741 \ -632 \ -526 \ -412 \ -223)$$

17) Determinação da diferença entre as perdas no ferro das seqüências positiva e negativa:

$$\Delta P_{fe} := \begin{cases} \text{for } j \in 1..6 \\ \Delta P_{fe1,j} \leftarrow \frac{V_{\delta 1,j}^2}{R_{fe}} \\ \Delta P_{fe} \end{cases}$$

$$\Delta P_{fe} = (21 \ 18 \ 16 \ 13 \ 11 \ 6)$$

18) Determinação da potência transferida para o eixo pelas seqüências positiva e negativa:

$$\Delta T_{f\_Tt} := \begin{cases} \text{for } j \in 1..6 \\ \Delta T_{f\_Tt1,j} \leftarrow \Delta P_{e1,j} - \Delta P_{j1,j} - \Delta P_{fe1,j} \\ \Delta T_{f\_Tt} \end{cases} \quad (8.80)$$

$$\Delta T_{f\_Tt} = (642.63 \ 560.58 \ 490.73 \ 429.82 \ 357.11 \ 236.30)$$

19) Determinação das perdas suplementares:

$$P_{sup} := \begin{cases} \text{for } j \in 1..6 \\ P_{sup1,j} \leftarrow \Delta T_{f\_Tt1,j} \cdot (1 - s_{1,j}) - P_{mecc1,j} \\ P_{sup} \end{cases} \quad (8.81)$$

$$P_{sup} = (568.99 \ 488.36 \ 419.86 \ 360.25 \ 289.12 \ 171.04)$$

20) Determinação das perdas suplementares devido à sequência negativa:

$$\text{Psneg} := \begin{cases} \text{for } j \in 1..6 \\ \text{Psneg}_{1,j} \leftarrow k_{1,j} \cdot \text{Psup}_{1,j} \\ \text{Psneg} \end{cases}$$

$$\text{Psneg} = (542.93 \ 465.94 \ 400.58 \ 343.43 \ 275.41 \ 162.06)$$

21) Determinação da relação quadrática entre a corrente negativa e a corrente nominal de teste:

$$\text{Ineg\_Itm} := \begin{cases} \text{for } j \in 1..6 \\ \text{Ineg\_Itm}_{1,j} \leftarrow \left( \frac{\text{Ineg}_{1,j}}{\text{Itm}} \right)^2 \\ \text{Ineg\_Itm} \end{cases}$$

$$\text{Ineg\_Itm} = (1.7703 \ 1.4975 \ 1.2467 \ 1.0117 \ 0.7941 \ 0.4330)$$

22) Determinação da relação quadrática entre a corrente eficaz e a corrente nominal de teste:

$$\text{Ief\_Itm} := \begin{cases} \text{for } j \in 1..6 \\ \text{Ief\_Itm}_{1,j} \leftarrow \left( \frac{\text{Ief}_{1,j}}{\text{Itm}} \right)^2 \\ \text{Ief\_Itm} \end{cases}$$

$$\text{Ief\_Itm} = (1.8553 \ 1.5695 \ 1.3067 \ 1.0613 \ 0.8336 \ 0.4570)$$

23) Regressão linear entre Ineg\_Itm e Psneg:

$$\text{zneg} := \text{line}(\text{Ineg\_Itm}^T, \text{Psneg}^T) \quad \text{zneg} = \begin{pmatrix} 48.61 \\ 281.15 \end{pmatrix}$$

24) Regressão linear entre Ief\_Itm e Psup:

$$\text{zief} := \text{line}(\text{Ief\_Itm}^T, \text{Psup}^T) \quad \text{zief} = \begin{pmatrix} 51.26 \\ 280.94 \end{pmatrix}$$

25) Determinação das perdas suplementares corrigidas a partir de Ineg\_Itm x Psneg:

$$\text{Psupc\_Ineg} := \begin{cases} \text{for } j \in 1..6 \\ \text{Psupc\_Ineg}_{1,j} \leftarrow \text{zneg}_2 \cdot \text{Ineg\_Itm}_{1,j} \\ \text{Psupc\_Ineg} \end{cases}$$

$$\text{Psupc\_Ineg} = (497.72 \ 421.02 \ 350.5 \ 284.45 \ 223.26 \ 121.75)$$

26) Determinação das perdas suplementares corrigidas a partir de  $I_{ef\_Itn} \times P_{sup}$ :

$$P_{supc\_Ief} := \begin{cases} \text{for } j \in 1..6 \\ P_{supc\_Ief_{1,j}} \leftarrow z_{ief_2} \cdot I_{ef\_Itn_{1,j}} \\ P_{supc\_Ief} \end{cases}$$

$$P_{supc\_Ief} = (521.23 \ 440.95 \ 367.1 \ 298.16 \ 234.2 \ 128.4)$$

27) Determinação das perdas suplementares de carga nominal a partir de  $I_{neg\_Itn} \times P_{sneg}$ :

$$P_{supc\_Ineg\_Nom} := z_{neg_2}$$

$$P_{supc\_Ineg\_Nom} = 281.15$$

28) Determinação das perdas suplementares de carga nominal a partir de  $I_{ef\_Itn} \times P_{sup}$ :

$$P_{supc\_Ief\_Nom} := z_{ief_2}$$

$$P_{supc\_Ief\_Nom} = 280.94$$

29) Verificações para validação do ensaio:

a) Relação entre as correntes de sequência positiva e negativa ( $I_{pn}$ ) menor que 0.300 em todos os pontos:

$$I_{pn} = (0.219 \ 0.219 \ 0.219 \ 0.221 \ 0.223 \ 0.235)$$

ok!

b) Escorregamento em todos os pontos menor que duas vezes o nominal:

$$s_n := \frac{r_{pms} - r_{pmn}}{r_{pms}}$$

$$s_n = 0.0233$$

$$2 \cdot s_n = 0.0467$$

$$s = (0.0209 \ 0.0215 \ 0.0219 \ 0.0221 \ 0.0221 \ 0.0217)$$

ok!

c) Coeficiente de correlação entre os pontos de  $I_{neg\_Itn} \times P_{sneg}$  maior ou igual a 0.95:

$$\text{corr}(I_{neg\_Itn}, P_{sneg}) = 0.999$$

ok!

d) Coeficiente de correlação entre os pontos de  $I_{ef\_Itn} \times P_{sup}$  maior ou igual a 0.95:

$$\text{corr}(I_{ef\_Itn}, P_{sup}) = 0.999$$

ok!

30) Conclusão:

Os valores de perdas suplementares de carga nominal usando  $I_{neg\_Itn} \times P_{sneg}$  e  $I_{ef\_Itn} \times P_{sup}$  são muito próximos, indicando que se pode dispensar o fator k.

### Anexo 10 - Eliminação do fator k

O item 8.9 deste trabalho apresenta um comentário de [8], onde sugere que se trace o gráfico de  $(I_{ef} / I_{tN})^2 \times P_{sup}$  ao invés de  $(I_- / I_{tN})^2 \times P_{sup(-)}$ , eliminando-se a necessidade da utilização do fator k, o qual determina a parcela de perdas suplementares devida à seqüência negativa  $P_{sup(-)}$ .

Onde:

$$I_{ef} = \sqrt{(I_+)^2 + (I_-)^2} = \sqrt{\frac{I_u^2 + I_v^2 + I_w^2}{3}}$$

#### A10.1 – Perdas suplementares devido à seqüência negativa

As perdas suplementares determinadas no ensaio eh-star englobam duas parcelas, uma devida à corrente de seqüência positiva e outra devida à corrente de seqüência negativa. Como a carga está representada pela seqüência negativa, o método eh-star apresenta um fator k que representa esta parcela de perdas, sendo este aplicado a todos os seis pontos do ensaio.

$$P_{sup(-)} = k \cdot P_{sup} \quad \text{Onde: } k = \frac{(I_-)^2}{(I_-)^2 + (I_+)^2}$$

Pelo gráfico  $(I_- / I_{tN})^2 \times P_{sup(-)}$ , obtém-se a equação:  $P_{sup(-)} = a \cdot (I_- / I_{tN})^2 + b$

Como as perdas suplementares por definição são nulas em vazio, despreza-se o parâmetro  $b$ , e a equação fica:  $P_{supc} = a \cdot (I_- / I_{tN})^2$  (perdas suplementares corrigidas).

Assim, para  $(I_- / I_{tN})^2 = 1$ , ou seja,  $I_- = I_{tN}$ , o parâmetro  $a$  determina o valor das perdas suplementares relativas à carga nominal do motor.

### A10.2 – Considerando a corrente eficaz

O gráfico  $(I_- / I_{tN})^2 \times P_{\text{sup}(-)}$  pode ser representado por  $(I_- / I_{tN})^2 \times (k \cdot P_{\text{sup}})$

Substituindo k tem-se:

$$\frac{(I_-)^2}{(I_{tN})^2} \times \frac{(I_-)^2}{(I_-)^2 + (I_+)^2} \cdot P_{\text{sup}} \rightarrow \frac{(I_+)^2 + (I_-)^2}{(I_{tN})^2} \times P_{\text{sup}}$$

$$\text{Como } I_{\text{ef}} = \sqrt{(I_+)^2 + (I_-)^2} \rightarrow (I_{\text{ef}})^2 = (I_+)^2 + (I_-)^2$$

$$\text{Tem-se então: } \frac{(I_{\text{ef}})^2}{(I_{tN})^2} \times P_{\text{sup}} \rightarrow \left( \frac{I_{\text{ef}}}{I_{tN}} \right)^2 \times P_{\text{sup}}$$

Pelo gráfico  $(I_{\text{ef}} / I_{tN})^2 \times P_{\text{sup}}$ , obtém-se a equação  $P_{\text{sup}} = a \cdot (I_{\text{ef}} / I_{tN})^2 + b$

Novamente, desprezando-se o parâmetro  $b$ , fica  $P_{\text{sup}c} = a \cdot (I_{\text{ef}} / I_{tN})^2$

Assim, para  $(I_{\text{ef}} / I_{tN})^2 = 1$ , ou seja,  $I_{\text{ef}} = I_{tN}$ , o parâmetro  $a$  determina o valor das perdas suplementares relativas à carga nominal do motor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] JORDAN H.; RICHTER E.; RÖDER G.; *A Simple Method to Measure Additional Losses in Induction Machines*, Journal ETZ-A, volume 88, no. 23, Darmstadt University of Technology, Germany, pp. 577-583, 1967.
- [2] BINDER A.; AOULKADI M.; *Guideline Eh-star-Circuit for Stray Loss measurement*, Darmstadt University of Technology, Germany, March 2005.
- [3] ALGER, P. L.; ANGT, G. & JOHN DAVIES, E.; *Stray Load Losses in Polyphase Induction Machines*, Trans. AIEE, pp. 349-357, 1957.
- [4] LIPO, T. A.; *Introduction to AC Machine Design*, vol. 1, University of Wisconsin – Madison, WisPERC, 1996.
- [5] CHALMERS, B. J.; *Electromagnetic Problems of A. C. Machines*, Chapman and Hall LTD, 1965.
- [6] SCHWARZ, K. K.; *Survey of Basic Stray Losses in Squirrel-Cage Induction Machines*, Proc. IEE, volume 111, pp 1565-1574, 1964.
- [7] JIMOH, A. A.; FINDLAY, R. D. & POLOUJADOFF, M.; *Stray Losses in Induction Machines*, IEEE, Vol.PAS-104, nº 6, pp 1506-1512, June 1985.
- [8] MACHADO, A. C.; PACHECO, J. E. S.; DA LUZ, M. V. F., et al, *Circuito para Medição das Perdas Suplementares Baseado no Método Eh-Star*, MOMAG, XIII SBMO e VIII CBMag, Florianópolis (Brasil), Setembro de 2008.
- [9] MACHADO, A. C.; PACHECO, J. E. S.; DA LUZ, M. V. F., et al, *Stray Load Losses Calculation Routine Based on the Eh-Star Method*, ICEM, XVIII International Conference on Electrical Machines, Portugal, September 2008.
- [10] IEEE. *Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*, 112, New York (U.S.A.), 2004.
- [11] IEC. *Method for Determining Losses and Efficiency of Three-Phase Cage Induction Motors*, 61972, Geneva (Switzerland), 2002.
- [12] IEC. *Standard Methods for Determining Losses and Efficiency from Tests (Excluding Machines for Traction Vehicles)*, 60034-2-1, Geneva, 2007.
- [13] DA LUZ, M. V. F.; *Estudo e Desenvolvimento de um Método de Cálculo de Perdas Suplementares em Motores de Indução de Gaiola*, Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, Fevereiro de 1999.
- [14] WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre.  
[http://pt.wikipedia.org/wiki/Componentes\\_sim%C3%A9tricas](http://pt.wikipedia.org/wiki/Componentes_sim%C3%A9tricas)